



**UNIVERSIDAD DEL NORTE**

## **TESIS DE MAESTRÍA**

**DESEMPEÑO DE LÍNEAS AÉREAS DE TRANSMISIÓN  
FRENTE A DESCARGAS ELÉCTRICAS ATMOSFÉRICAS:  
ANÁLISIS DE LA FALLA DE APANTALLAMIENTO EN  
ZONAS DE TOPOGRAFÍA MONTAÑOSA**

**VÍCTOR HUGO JIMÉNEZ MÉNDEZ**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA  
PROGRAMA DE MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELÉCTRICA  
BARRANQUILLA  
2013**

**DESEMPEÑO DE LÍNEAS AÉREAS DE TRANSMISIÓN  
FRENTE A DESCARGAS ELÉCTRICAS ATMOSFÉRICAS:  
ANÁLISIS DE LA FALLA DE APANTALLAMIENTO EN  
ZONAS DE TOPOGRAFÍA MONTAÑOSA**

**VÍCTOR HUGO JIMÉNEZ MÉNDEZ**

Monografía para optar al grado de Magíster en Ingeniería Eléctrica

Director

**JOHNY MONTAÑA**

**Ingeniero electricista, MSc, PhD**

**UNIVERSIDAD DEL NORTE  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA  
PROGRAMA DE MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELÉCTRICA  
BARRANQUILLA  
2013**



**NOTA DE ACEPTACIÓN**

-----  
-----  
-----  
-----  
-----  
-----  
-----  
-----

-----  
**Presidente del Jurado**

-----  
**Jurado 1**

-----  
**Jurado 2**

Barranquilla, 05 de Noviembre de 2013



*A Jehová de los ejércitos, fuente de todo conocimiento.*

*A Emelson y Carolina, mis queridos padres.*

*A mis hermanos Rubén y David.*

*A mis hijos Carola, Víctor, Santiago y Paola, pilares de mi existencia.*

*A mi amada esposa Dalys, por su inagotable dulzura.*

## **AGRADECIMIENTOS**

---

Primeramente, agradezco a Dios por conceder su gracia a este trabajo de investigación.

Agradezco a mi padre, Emelson, por tener fe en todo lo que hago y por mostrarme continuamente que los valores, los principios, el amor por la familia y el respeto por los demás, convierten a un buen hombre en un gran ser humano.

A mi madre, Carolina, por enseñarme a encomendar todos mis caminos en las manos de Dios.

A mis hermanos, Rubén y David, por su compañía en los momentos cruciales de mi vida.

A mi esposa, Dalys, porque con amor pospuso sus metas profesionales para dar lugar este proyecto.

A mis hijos Carola, Víctor, Santiago y Paola, por ser el impulso que necesito cada mañana y por demostrarme cada noche que todo valió la pena.

A Maye, por enseñarme lo maravilloso que hay en la humildad de corazón.

Agradezco especialmente al Profesor Johny Montaña por aceptar dirigir esta tesis de maestría. Su invaluable orientación se constituyó en el aporte fundamental para mi formación como investigador. Su confianza y respeto han hecho posible que este trabajo de investigación salga a la luz en la comunidad científica.

Al profesor John Candelo por brindarme la oportunidad de hacer parte del selecto grupo de estudiantes de maestría y por sus acertados aportes a lo largo del proceso de formación, el cual, también contó con el concurso especial de los profesores María G. Calle y Carlos Ardila.

Agradezco también a los ingenieros Juan P. Tello y Jairo Cardona por sus contribuciones en el desarrollo de los objetivos de la investigación.

Finalmente, agradezco a los profesores Horacio Torres y Mauricio Vargas por sus invaluable aportes al afinamiento conceptual del presente documento.

# TABLA DE CONTENIDO

---

LISTA DE FIGURAS.....	vii
LISTA DE TABLAS.....	x
<b>1 PREÁMBULO.....</b>	<b>1</b>
1.1 Marco teórico .....	1
1.2 Planteamiento del problema .....	4
1.3 Propuesta de solución .....	5
1.4 Objetivos de la tesis .....	6
1.5 Motivación .....	6
1.6 Justificación.....	7
1.7 Alcances y limitaciones .....	8
1.8 Estructura de la tesis.....	8
<b>2 ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE .....</b>	<b>10</b>
2.1 Introducción al fenómeno del rayo .....	10
2.1.1 Formación y evolución de las descargas eléctricas atmosféricas.....	11
2.1.1.1 Carga eléctrica en las nubes .....	11
2.1.1.2 Clasificación de las descargas eléctricas atmosféricas .....	11
2.1.1.3 Proceso de las descargas nube-tierra.....	13
2.1.1.4 El trueno.....	16
2.1.2 Parámetros de las descargas eléctricas atmosféricas .....	16
2.1.2.1 Forma de onda de la corriente.....	16
2.1.2.2 Polaridad .....	18
2.1.2.3 Ángulo de incidencia .....	19
2.1.3 Medición de las descargas eléctricas atmosféricas .....	19
2.2 Apantallamiento en líneas de transmisión.....	21
2.2.1 Retrospectiva .....	21
2.2.2 Ubicación del cable de guarda.....	23
2.2.2.1 Ángulo de apantallamiento .....	23
2.2.2.2 Métodos clásicos .....	25
2.2.2.3 Métodos modernos .....	28
2.2.3 Modelos de enlace del rayo con las líneas .....	29
2.2.3.1 Modelos Electrogeométricos.....	29



2.2.3.2	El Modelo de Eriksson .....	48
2.2.3.3	Modelos Genéricos (GM) .....	55
2.2.3.4	Aportes recientes .....	62
2.2.3.5	Incidencia de rayos sobre la línea .....	66
2.2.3.6	Evaluación de la tasa de salidas por fallas de apantallamiento ....	68
2.2.4	Ángulo de apantallamiento efectivo .....	70
2.3	Conclusiones .....	71
<b>3</b>	<b>PROPUESTA PARA EVALUAR LA SFFOR EN ZONAS DE TOPOGRAFÍA MONTAÑOSA .....</b>	<b>73</b>
3.1	Parámetros del rayo .....	73
3.1.1	Incidencia .....	74
3.1.2	Polaridad .....	79
3.1.3	Distribución de probabilidad de la corriente del rayo .....	80
3.1.4	Multiplicidad .....	82
3.2	El Modelo de enlace .....	83
3.2.1	Distancia de impacto al conductor .....	86
3.2.2	Distancia de impacto al suelo .....	89
3.3	Pendiente lateral del terreno .....	90
3.4	Corriente máxima de falla de apantallamiento .....	94
3.5	Ángulo de aproximación del rayo .....	95
3.6	Flecha del conductor y perfil longitudinal del terreno .....	101
3.7	Diagrama de flujo .....	107
3.8	Conclusiones .....	108
<b>4</b>	<b>RESULTADOS Y ANÁLISIS .....</b>	<b>110</b>
4.1	Análisis de la corriente máxima de falla de apantallamiento .....	111
4.1.1	Efecto de la oblicuidad del terreno .....	113
4.1.2	Efecto de la altura del conductor sobre el suelo .....	116
4.2	Análisis del ancho expuesto de la línea .....	125
4.3	Análisis de la tasa de salidas por fallas de apantallamiento .....	133
4.4	Conclusiones .....	142
<b>5</b>	<b>CONCLUSIONES FINALES Y TRABAJOS FUTUROS .....</b>	<b>145</b>
5.1	Conclusiones .....	145
5.2	Aportes .....	147
5.3	Futuras líneas de trabajo .....	147

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	149
ARTÍCULO .....	161

# LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1 Ilustración de un rayo entrando en un SEP (Adaptado de [1]).....	2
Figura 2-1. Distribución tripolar de carga en las nubes de tormenta.....	11
Figura 2-2. Clasificación de las descargas eléctricas atmosféricas (Adaptado de [19]) .....	12
Figura 2-3. Tipos de descargas entre nube y tierra (Adaptado de [19]) .....	12
Figura 2-4. Evolución de una descarga eléctrica atmosférica nube-tierra negativa.....	13
Figura 2-5. Evolución de la descarga (simplificada) .....	14
Figura 2-6. Reproducción del proceso completo de la descarga eléctrica .....	15
Figura 2-7. Forma de onda (normalizada) de la corriente del rayo según CIGRÉ [13] .....	17
Figura 2-8. Campo magnético generado por la corriente de la descarga .....	20
Figura 2-9 Ilustración del ángulo de apantallamiento .....	24
Figura 2-10 Signo del ángulo de apantallamiento .....	24
Figura 2-11 Ubicación del cable de guarda según Charles (a) y Wagner (b) .....	25
Figura 2-12 Ubicación del cable de guarda según el criterio de Schwaiger .....	26
Figura 2-13 Ubicación del cable de guarda según el criterio de Langrehr .....	27
<b>Figura 2-14</b> Proceso de conexión de los líderes del rayo .....	30
Figura 2-15 Concepto de distancia de impacto (crítica o de ruptura).....	32
Figura 2-16 Distancia de impacto vs. Corriente pico de la descarga .....	34
Figura 2-17 Aplicación de los EGM para un solo conductor .....	35
Figura 2-18 Distancia lateral atractiva - conductor no apantallado .....	36
Figura 2-19 Definición de ángulos y distancias .....	39
Figura 2-20 Definición de la corriente máxima de falla de apantallamiento .....	41
Figura 2-21 Buscando la corriente máxima de falla del apantallamiento .....	42
Figura 2-22 Distancia lateral atractiva (Línea monofásica apantallada).....	43
<b>Figura 2-23</b> Corriente máxima de falla de apantallamiento -EGM.....	44
Figura 2-24 Ángulo de apantallamiento perfecto ( $I_{crit} = 4 \text{ kA}$ ) – EGM .....	45
Figura 2-25 Ángulo de apantallamiento perfecto ( $I_{crit} = 8 \text{ kA}$ ) - EGM.....	46
Figura 2-26 Modelo de una Línea de transmisión trifásica apantallada .....	47
<b>Figura 2-27</b> El método del Volumen de captación de Eriksson.....	48
Figura 2-28 Radio de atracción vs Corriente pico – IEGM de Eriksson.....	50
<b>Figura 2-29</b> Análisis de apantallamiento - IEGM de Eriksson.....	51
<b>Figura 2-30</b> Buscando la Corriente máxima de falla de apantallamiento - IEGM .....	52
Figura 2-31 Corriente máxima de falla de apantallamiento – IEGM de Eriksson.....	53
Figura 2-32 Ángulo de apantallamiento perfecto – IEGM de Eriksson.....	53
<b>Figura 2-33</b> Ángulos de apantallamiento perfecto – comparación EGM e IEGM.....	54
Figura 2-34 Condiciones para que se produzca el impacto según los GM .....	56

Figura 2-35 Modelos genéricos – Clasificación de Berger & Äit-Amar .....	57
Figura 2-36 Análisis de apantallamiento – Modelos genéricos.....	57
Figura 2-37 Radio de atracción vs Corriente de la descarga - GM .....	59
Figura 2-38 Radio de atracción vs Altura del conductor - GM.....	59
Figura 2-39 Corriente máxima de falla de apantallamiento - GM.....	60
Figura 2-40 Ángulo de apantallamiento perfecto ( $I_{crit} = 4 \text{ kA}$ ) - GM .....	61
Figura 2-41 Ángulo de apantallamiento perfecto ( $I_{crit} = 8 \text{ kA}$ ) - GM .....	61
Figura 2-42 Distancia de impacto a tierra, incluyendo aportes de Torres y Cooray .....	62
Figura 2-43 Corriente máxima de falla de apantallamiento – Modelo estadístico.....	65
Figura 2-44 Ángulo de apantallamiento perfecto– Modelo estadístico.....	66
Figura 3-1 Mapa de isoniveles cerámicos para Colombia (NTC 4552-1) .....	75
Figura 3-2 Mapa de Densidades de Descargas a Tierra ( <i>GFD</i> ).....	76
Figura 3-3 Comparación de resultados de expresiones empíricas para calcular la <i>GFD</i> ....	78
Figura 3-4 Densidad de probabilidad dependiendo de la polaridad del rayo .....	81
Figura 3-5 Probabilidad acumulada dependiendo de la polaridad del rayo.....	81
Figura 3-6 Concepto de distancia lateral atractiva .....	85
Figura 3-7 Distancia de impacto según Grzybowski (rayos negativos) .....	87
Figura 3-8 Distancia de impacto según Grzybowski (rayos positivos) .....	87
Figura 3-9 Distancia lateral atractiva según Grzybowski (rayos negativos y positivos) .....	88
Figura 3-10 EGM esquemático considerando la inclinación lateral del terreno.....	90
Figura 3-11. Líder descendente en un terreno inclinado .....	92
Figura 3-12. Diagrama esquemático para calcular la inclinación lateral del terreno.....	93
Figura 3-13 Buscando el valor de $I_{max}$ .....	94
Figura 3-14 Densidad de probabilidad del ángulo de incidencia de la descarga .....	96
Figura 3-15 Análisis geométrico del EGM considerando el ángulo de la descarga.....	97
Figura 3-16 Análisis geométrico de la protección del arco superior sobre el arco inferior.	98
Figura 3-17 Análisis del EGM considerando el ángulo de la descarga .....	98
Figura 3-18 Ángulo de incidencia del rayo – Torre para doble circuito.....	100
Figura 3-19 Ubicación de la flecha para un vano largo y desnivelado .....	101
Figura 3-20 Cálculo de las alturas del conductor en cualquier punto del vano.....	102
Figura 3-21. Diagrama de flujo para calcular la <i>SFFOR</i> de acuerdo con el método propuesto .....	107
Figura 4-1 Torre típica en líneas de transmisión a 400 kV .....	111
Figura 4-2 Comparación de los modelos de enlace para - $I_{max}$ (torre).....	113
Figura 4-3 Comparación de los modelos de enlace para - $I_{max}$ (medio vano) .....	113
Figura 4-4. Corriente máxima de falla de apantallamiento vs Oblicuidad del terreno.....	114
Figura 4-5. Perfil topográfico transversal (oblicuidad lateral del terreno).....	115
Figura 4-6. Posición relativa entre el cable de guarda, el conductor y el terreno.....	116
Figura 4-7. Variación de $I_{max}$ con el terreno (IEEE 1243) – $\theta \leq 0^\circ$ .....	117
Figura 4-8. Variación de $I_{max}$ con el terreno (IEEE 1243) – $\theta \geq 0^\circ$ .....	117
Figura 4-9. Variación de $I_{max}$ con el terreno (Vargas & Torres) – $\theta \leq 0^\circ$ .....	118

Figura 4-10. Variación de $I_{\max}$ con el terreno (Vargas & Torres) – $\theta \geq 0^\circ$ .....	118
Figura 4-11. Variación de $I_{\max}$ con el terreno (Brown & Whitehead) – $\theta \leq 0^\circ$ .....	119
Figura 4-12. Variación de $I_{\max}$ con el terreno (Brown & Whitehead) – $\theta \geq 0^\circ$ .....	119
Figura 4-13. Variación de $I_{\max}$ con el terreno - rayos negativos (Grzybowski) – $\theta \leq 0^\circ$ .....	120
Figura 4-14. Variación de $I_{\max}$ con el terreno - rayos negativos (Grzybowski) – $\theta \geq 0^\circ$ .....	120
Figura 4-15. Variación de $I_{\max}$ con el terreno - rayos positivos (Grzybowski) – $\theta \leq 0^\circ$ .....	121
Figura 4-16. Variación de $I_{\max}$ con el terreno - rayos positivos (Grzybowski) – $\theta \geq 0^\circ$ .....	121
Figura 4-17. Variación de $I_{\max}$ con el terreno (Rizk) – $\theta \leq 0^\circ$ .....	122
Figura 4-18. Variación de $I_{\max}$ con el terreno (Rizk) – $\theta \geq 0^\circ$ .....	122
Figura 4-19. Variación relativa de la altura del conductor sobre el terreno .....	124
Figura 4-20. Ancho expuesto ante descargas negativas (Rizk) .....	125
Figura 4-21. Ancho expuesto ante descargas negativas (IEEE 1243) .....	126
Figura 4-22. Ancho expuesto ante descargas negativas (Brown & Whitehead) .....	127
Figura 4-23. Ancho expuesto ante descargas negativas (Vargas & Torres) .....	128
Figura 4-24. Ancho expuesto ante descargas negativas (Grzybowski & Disyadej) .....	129
Figura 4-25. Ancho expuesto ante descargas positivas (Grzybowski & Disyadej) .....	130
Figura 4-26. Ancho expuesto – rayos negativos y positivos (Grybowski & Disyadej) .....	131
Figura 4-27. Terrenos básicos para analizar [128] .....	134
Figura 4-28. <i>SFFOR</i> normalizada para una cima ( $-20^\circ$ ) .....	135
Figura 4-29. <i>SFFOR</i> normalizada para una ladera ( $\pm 20^\circ$ ) .....	135
Figura 4-30. <i>SFFOR</i> normalizada para un valle ( $20^\circ$ ) .....	136
Figura 4-31. <i>SFFOR</i> normalizada para una planicie .....	136
Figura 4-32. <i>SFFOR</i> normalizada (IEEE 1243-1997) .....	138
Figura 4-33. <i>SFFOR</i> normalizada (Vargas & Torres) .....	138
Figura 4-34. <i>SFFOR</i> normalizada (Brown & Whithead) .....	139
Figura 4-35. <i>SFFOR</i> normalizada (Grzybowski & Disyadej) .....	139
Figura 4-36. <i>SFFOR</i> no normalizada (Tramo de 1.25 km) .....	140
Figura 4-37. <i>SFFOR</i> no normalizada (Tramo de 1.25 km) – Grzybowski & Disyadej .....	141

# LISTA DE TABLAS

---

Tabla 2-1 Valores de $A$ , $B$ e $\gamma$ .....	33
Tabla 2-2. Valores de $\xi$ , $\zeta$ , $E$ , $F$ y $G$ .....	58
Tabla 3-1. Ecuaciones de la $GFD$ en función del Nivel cerámico .....	77
Tabla 3-2. Parámetros estadísticos para la primera descarga de retorno (Cigré).....	80
Tabla 3-3. Parámetros estadísticos del rayo para Colombia.....	81
Tabla 3-4 Parámetros de la distribución del ángulo de incidencia de la descarga ..	96
Tabla 4-1. Corriente máxima de falla de apantallamiento [kA] – Torre 400 kV ....	112
Tabla 4-2. Tasa de salidas normalizada considerando la inclinación del terreno .	134



# 1

## PREÁMBULO

---

### 1.1 Marco teórico

El rayo es un extraordinario fenómeno natural que ha fascinado al hombre desde el principio de los tiempos, pero es tristemente célebre debido a su capacidad destructiva.

Básicamente, un rayo consiste en una poderosa descarga electrostática, transitoria, de tipo atmosférico y que está acompañada por emisión de luz y sonido: el relámpago y el trueno<sup>1</sup>, respectivamente; siendo este último el que normalmente alerta de su ocurrencia.

Cuando un rayo impacta contra la tierra es porque existió una transferencia de carga entre la nube y el terreno, liberando así una enorme cantidad de energía, la cual, es precisamente la que hace del rayo una fuerza destructiva para las estructuras en tierra<sup>2</sup>, si estas no están protegidas adecuadamente. Por lo tanto, se deben adoptar las medidas necesarias para evitar amenazas a la vida y daños a los bienes.

Los Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP) no son la excepción, pues se toman precauciones para evitar daños que puedan arriesgar la confiabilidad del servicio y/o generar costosos reemplazos de equipos.

Generalmente, los SEP constan de tres niveles: generación, transmisión y distribución. Los rayos afectan los SEP en todos los niveles (ver [Figura 1-1](#)). Si un rayo incide sobre una línea aérea que transporta o distribuye potencia, entonces se produce una sobretensión<sup>3</sup> que puede causar daños en diferentes equipos, desde los dispositivos del SEP hasta los electrodomésticos más sensibles de los usuarios.

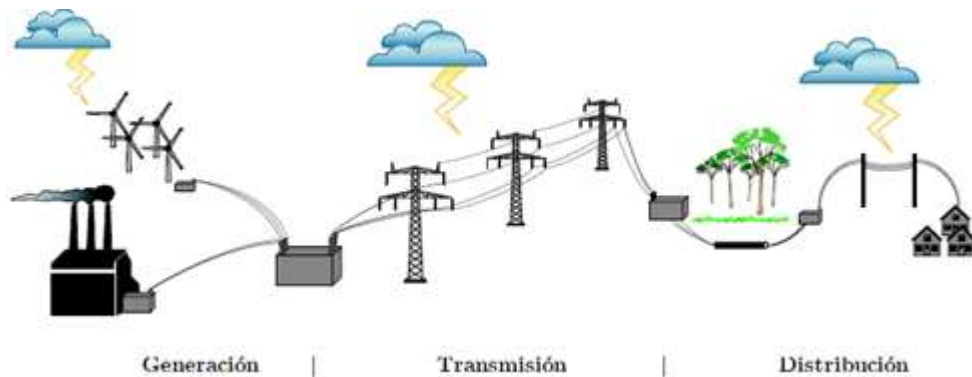
---

<sup>1</sup> Se produce porque la electricidad de la atmósfera calienta y expande rápidamente el aire.

<sup>2</sup> Construcciones (edificaciones y antenas) e incluso seres vivos (árboles, animales y personas).

<sup>3</sup> Por Ley de Ohm, la sobretensión existe gracias a la corriente de la descarga y a la impedancia del sistema.





**Figura 1-1** Ilustración de un rayo entrando en un SEP (Adaptado de [1])

Una sobretensión consiste en una sollicitación eléctrica variable en el tiempo, cuyo valor máximo es superior al pico de la tensión de operación de un elemento del SEP. Atendiendo a su origen, al tipo de proceso transitorio y al tiempo de duración, las sobretensiones se pueden clasificar así [2]:

- ❖ **Sobretensiones a frecuencia industrial:** son de larga duración (varios milisegundos), poco amortiguadas y de frecuencia cercana a la de operación del sistema; por ejemplo, las sobretensiones debidas a un cortocircuito fase-tierra.
- ❖ **Sobretensiones por maniobra:** son de corta duración, fuertemente amortiguadas y presentan un rango de frecuencias de 2 a 10 kHz; típicamente, se originan por maniobras de conexión o de desconexión, sin embargo algunas sobretensiones transitorias provocadas por cortocircuitos pueden clasificarse como de maniobra.
- ❖ **Sobretensiones de origen atmosférico:** son de muy corta duración y una amplitud que puede ser bastante superior a la tensión pico nominal del sistema. Se deben a una descarga eléctrica atmosférica (rayo).

A pesar de esta tipificación, no existe un límite definido entre un tipo y otro de sobretensión; por ejemplo, un cortocircuito puede originar una sobretensión de tipo temporal pero, desde el punto de vista del transitorio, se puede clasificar como sobretensión por maniobra. Por otro lado, la severidad de la sobretensión depende de la tensión de operación del sistema; por ejemplo, en Líneas Aéreas de Transmisión (LAT) con tensión nominal inferior a 500 kV, las sobretensiones por rayos son las más perjudiciales y gobiernan la selección del aislamiento de las líneas, mientras que por encima de este nivel las sobretensiones por maniobra suelen ser las más importantes.

Las sobretensiones de origen atmosférico constituyen la causa más común de salida de servicio de las LAT. Cuando un rayo incide sobre una línea se origina una sobretensión que puede producir flameo en los aisladores<sup>4</sup>, lo que implicaría una falla a tierra porque la sobrecorriente asociada se descarga al suelo a través de la torre. Una vez superada la sobretensión, si aún persiste el flameo, entonces las protecciones eléctricas despejarán la falla mediante la desconexión y subsecuente re-cierre de la línea, lo que representa una interrupción en el servicio<sup>5</sup>.

Durante la etapa de diseño de una línea eléctrica se definen el nivel de aislamiento y el sistema de protección contra rayos de forma que, durante la operación anual, no se supere un índice aceptable de interrupciones del servicio. En Colombia, la Comisión Reguladora de Energía y Gas (CREG) establece que este índice (o tasa) no debe superar las 3 salidas anuales por cada 100 km de línea [3].

En general, las líneas así como otros elementos del SEP pueden ser protegidas de dos maneras:

- ❖ Instalando uno o más cables de guarda<sup>6</sup> por encima de los conductores de fase y conectándolos a tierra en cada una de las torres.
- ❖ Instalando descargadores de sobretensión que reducen las tensiones excesivas disipando la energía cuando las derivan a tierra.

La función principal del cable de guarda es interceptar la mayoría de los rayos que inciden sobre la línea y derivarlos a tierra, aceptando que sólo un porcentaje muy reducido de descargas pueda alcanzar a algún conductor de fase. Sin embargo, cuando un rayo impacta contra el cable de guarda también se pueden presentar flameos producidos por sobretensiones presentes entre la torre y el conductor de fase; fenómeno que se conoce como *Flameo inverso* y que depende básicamente de los valores de impedancia del apoyo y su puesta a tierra. También puede suceder que el rayo no impacte en el cable de guarda ni contra el conductor de fase, sino que lo haga en tierra y que, además, dicho impacto genere un campo electromagnético que se acople con los conductores de fase; en tal situación se

---

<sup>4</sup> El flameo se presenta solamente si la sobretensión originada supera el nivel del aislamiento de la línea.

<sup>5</sup> Normalmente, la interrupción o salida de la línea tiene una duración de unos pocos segundos.

<sup>6</sup> *Overhead Ground Wires* OHGW por sus siglas en inglés. También se conocen como Shield Wires, en el lenguaje técnico de habla inglesa. El cable de guarda y su interconexión a tierra en líneas de transmisión son el principio de una Jaula de Faraday, lo cual busca “eliminar” la influencia del campo electrostático atmosférico sobre los conductores de fase.

induce una sobretensión que, en algunos casos, podría provocar el flameo de los aisladores. Luego, los flameos debidos a los rayos se pueden clasificar, de acuerdo con el punto de impacto sobre la línea, así:

❖ **Flameos por descargas directas:**

- ❖ **Flameo por falla del apantallamiento<sup>7</sup> (SFFO):** ocurre cuando un rayo impacta contra un conductor de fase energizado.
- ❖ **Flameo inverso<sup>8</sup> (BFO):** se produce cuando un rayo impacta en la torre o en el cable de guarda.

❖ **Flameos por descargas indirectas:**

- ❖ **Flameo por tensión inducida<sup>9</sup> (IVFO):** se origina cuando un rayo impacta en las cercanías de la línea.

La eficiencia de la protección con cables de guarda depende de la posición de éstos respecto de los conductores de fase, pero siendo las relaciones muy complicadas ya que existen varios factores independientes que influyen, como la frecuencia de ocurrencia y magnitud de los rayos, por lo que no es posible hablar de una solución analítica al problema, sino solamente de aproximaciones teórico-experimentales. Así mismo, cabe destacar que no existe un método infalible para determinar el sitio de impacto de un rayo sobre una línea eléctrica, pero sí existen métodos para posicionar el cable de guarda de manera que “atraiga” a todas las descargas que atenten contra la seguridad de la línea y también existen métodos para evaluar el desempeño de las línea frente a este fenómeno natural.

## 1.2 Planteamiento del problema

Como práctica conservadora de ingeniería, en las primeras etapas del diseño de una LAT, dado que se desconocen los resultados de la localización definitiva de torres, se estudia la influencia de las descargas atmosféricas sobre la torre más alta, bajo la premisa que ésta representa la condición más desfavorable<sup>10</sup>. No obstante, sucede que en algunas regiones, cuando los diseños se materializan y las líneas entran en operación, el comportamiento esperado ante el rayo difiere de lo que se predice, es decir, existen áreas donde la tasa real de salidas es superior a la

---

<sup>7</sup> *Shielding Failure Flashover* SFFO por sus siglas en inglés.

<sup>8</sup> *Back-Flashover* BFO por sus siglas en inglés.

<sup>9</sup> *Induced-Voltage Flashover* IVFO por sus siglas en inglés. Afectan principalmente a líneas y redes de distribución, pero no a las líneas de transmisión.

<sup>10</sup> El resultado es una tasa de salidas mayor que si se utiliza una torre con altura promedio.

estimada, lo que ocasiona pérdidas económicas por fallas en el servicio de energía. También existen sectores donde la tasa real es muy baja comparada con la estimada, lo que plantea la posibilidad de que se hayan hecho inversiones innecesarias en el sistema de protección contra rayos de la línea.

Actualmente, para predecir la tasa de salidas de las LAT se emplean métodos que, a menudo, no reflejan circunstancias específicas de las fallas por causa de las descargas eléctricas atmosféricas; por ejemplo, no consideran las condiciones de topografía del corredor ni tampoco la variabilidad que puede existir en cuanto a la densidad de rayos a tierra para diferentes sectores de la línea. Con estas limitaciones no es posible determinar los puntos que, a lo largo de la línea, son susceptibles de causar los flameos; esto afecta la toma de acciones preventivas por parte del diseñador y correctivas por parte del operador de red.

### **1.3 Propuesta de solución**

Como una opción a las técnicas que se emplean actualmente y siguiendo la línea de trabajo de otros investigadores [4, 5], en esta tesis se presenta un método analítico para evaluar el desempeño de las líneas aéreas de transmisión frente al impacto directo de rayos<sup>11</sup>, teniendo en cuenta aquellos aspectos que no se incluyen en los métodos convencionales y que podrían causar diferencias entre el desempeño real y el esperado. Tales aspectos incluyen la polaridad, multiplicidad y ángulo de aproximación del rayo, la distribución de la densidad de rayos a lo largo del corredor de la línea, la variación de la altura de los conductores a lo largo de los vanos y la topografía del sitio de cada torre.

Lo expuesto supone el carácter innovador de esta tesis porque si bien tales aspectos se han tratado antes [6-8], sólo hasta ahora se están integrando en un método definido. Además, por considerar la variabilidad de topografía y actividad ceráunea a lo largo de la línea, el método puede facilitar la identificación de puntos críticos dónde deberían actuar los ingenieros para mejorar los diseños de líneas nuevas o aumentar la confiabilidad de líneas existentes.

---

<sup>11</sup> Solo se tienen en cuenta flameos por fallas de apantallamiento, más no pro flameos inversos.

## 1.4 Objetivos de la tesis

El propósito de esta tesis es presentar un método para evaluar la falla de apantallamiento en líneas aéreas de transmisión que discurren por zonas de topografía montañosa, considerando la influencia de la polaridad, multiplicidad y ángulo de aproximación de los rayos.

Los objetivos que se plantean son los siguientes:

- ❖ Evaluar la variación de la geometría de una línea de transmisión a lo largo de su trazado, teniendo en cuenta los cambios en la cota del terreno y evaluar el área de exposición de la línea ante descargas eléctricas atmosféricas cuando éstas no inciden verticalmente.
- ❖ Desarrollar un procedimiento que, a partir de los datos del perfil topográfico de la línea, permita estimar el aporte que hace cada torre a la tasa de flameos por fallas de apantallamiento.
- ❖ Valorar la variación en los resultados derivados con dicho procedimiento, respecto de los obtenidos a partir del método estándar IEEE-1243:1997.
- ❖ Analizar la influencia que tienen en la tasa de salidas por fallas de apantallamiento, la polaridad y multiplicidad de las descargas así como el modelo de enlace del rayo<sup>12</sup>.

## 1.5 Motivación

En Colombia, conforme se desarrollan las regiones, se requieren proyectos de transmisión de potencia eléctrica que se caractericen por ser confiables, tener gran capacidad y cubrir largas distancias a través de paisajes montañosos.

Por estar situado en una zona de confluencia intertropical, el país presenta una de las mayores actividades de descargas eléctricas atmosféricas del mundo, razón por la que muchas salidas de servicio de las líneas aéreas de transmisión son atribuidas a los rayos<sup>13</sup>. Además, las regiones están bien diferenciadas y por tanto el comportamiento de las descargas no es el mismo, ni siquiera en la misma región. Por otra parte, de acuerdo con los resultados de líneas monitoreadas se tiene que

---

<sup>12</sup> Se contemplarán las versiones más relevantes de los EGM.

<sup>13</sup> La actividad de rayos se constituye en un factor que no es controlable en cuanto a las medidas que adoptan las empresas de energía del país para garantizar los niveles de confiabilidad de los subsistemas de transmisión.

cuanto más compleja la topografía y más frecuente la actividad ceráúnea, el número de salidas de servicio de las líneas por causa de rayos en una zona montañosa es mayor que en terreno plano, en especial lo que corresponde a las fallas de apantallamiento [9, 10].

Hoy en día, el diseño de las LAT se hace con base en estudios y procedimientos desarrollados en países con características climáticas y topográficas distintas a las de Colombia, lo que implica que puedan no ser apropiados en términos técnicos y/o económicos.

Las particularidades mencionadas invitan a formular soluciones que, con base en un análisis más a fondo del que brindan las técnicas disponibles en la actualidad, permitan a los ingenieros tener fundamentos para tomar medidas que minimicen la afectación de las líneas de transmisión debida a este tipo de descargas y así aumentar la confiabilidad del Sistema Interconectado Nacional (SIN).

Por lo expuesto, es motivación de la presente tesis contribuir a mejorar el desempeño de las líneas aéreas de transmisión frente al fenómeno del rayo, especialmente en Colombia, donde el clima y la topografía representan un reto para los proyectos de transporte de potencia eléctrica.

## **1.6 Justificación**

Existe una profusa literatura centrada en el estudio del comportamiento de las LAT frente a los rayos, sin embargo, algunos aspectos que involucran la interacción de las líneas con este fenómeno natural no han sido integrados apropiadamente en un método para estimar la tasa de salidas. Luego, esta tesis encuentra su justificación teórica en la necesidad de estudiar diferentes modelos de enlace del rayo con las líneas de transmisión y algunos métodos para el cálculo de la tasa de salidas debidas al fenómeno; esto con el propósito de realizar un aporte al tema a través del enfoque que se propone. Por otro lado, la tesis encuentra su justificación práctica en que la propuesta puede proporcionar una opción técnica para el diseño y operación de líneas pertenecientes al SIN, donde se busca minimizar las salidas de servicio de éstas por causa de las descargas eléctricas atmosféricas.

## 1.7 Alcances y limitaciones

Esta tesis está dedicada al análisis del comportamiento de líneas aéreas de transmisión frente a descargas eléctricas atmosféricas. El propósito es calcular la tasa de salidas debido a fallas de apantallamiento, en función de los parámetros más representativos del rayo y de la línea, así como de la actividad atmosférica de la zona por donde esta discurre.

El estudio se centra en líneas apantalladas, con máximo dos circuitos y dos cables de guarda, caso en el que se asume simetría en la configuración de las torres. No obstante, con fines puramente ilustrativos, a lo largo de la tesis se usa una línea monofásica para el análisis de la falla de apantallamiento.

En lo que respecta a los modelos de enlace del rayo con las LAT, sólo se estudian dos grupos: Modelos basados en la *Teoría Electrogeométrica* y modelos simplificados basados en la *Progresión del líder escalonado*. Sus fundamentos se explican con detenimiento en el numeral 2.2.3 del presente documento.

Respecto de los métodos para calcular la tasa de salidas, el análisis se limita a los más conocidos en la literatura abierta: Método IEEE<sup>14</sup> [11, 12] y Método CIGRÉ<sup>15</sup> [13, 14]. Varios de estos procedimientos se han implementado en aplicaciones informáticas, destacándose: FLASH<sup>16</sup> [9, 15]; DESCARGA<sup>17</sup> y LPTL<sup>18</sup> [16].

## 1.8 Estructura de la tesis

La presente tesis se ha estructurado de la siguiente manera:

El [Capítulo 2](#) consiste en una revisión de la literatura abierta sobre el tema. Primero se hace una introducción a la física del fenómeno del rayo, con un vistazo rápido a los parámetros relevantes para aplicaciones de ingeniería y, seguidamente, se exponen los modelos de enlace del rayo con las LAT y cómo éstos se usan para determinar su punto de impacto.

---

<sup>14</sup> *Institute of Electrical and Electronics Engineers* IEEE, por sus siglas en inglés.

<sup>15</sup> *Conférence Internationale des Grands Réseaux Électriques a Haute Tension* CIGRÉ, por sus siglas en francés.

<sup>16</sup> Desarrollado por el IEEE Working Group on Lightning Performance of Overhead Lines 15.09.08.

<sup>17</sup> Desarrollado en la Universidad Técnica de Lisboa con base en las recomendaciones del CIGRÉ WG3301.

<sup>18</sup> *Lightning Performance of Overhead Transmission Lines* LPTL, por sus siglas en inglés. Es un software académico desarrollado en el Laboratorio de Alta Tensión de la Universidad de Thessaloniki, Grecia.

En el Capítulo **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se presenta un nuevo enfoque para evaluar la falla de apantallamiento de una línea de transmisión. Inicialmente, se propone el uso de un modelo de enlace del rayo que permitirá determinar las zonas expuestas de la línea; luego se muestra la formulación necesaria para calcular la variabilidad de la posición de los conductores con respecto al suelo y así tener en cuenta la topografía del corredor de la línea; esto, considerando el ángulo de aproximación del rayo, su polaridad y su multiplicidad.

El análisis y comparación de los resultados de aplicar el enfoque propuesto con los métodos convencionales se muestra en el Capítulo **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, donde además se lleva a cabo un análisis de sensibilidad con respecto a algunos factores como la flecha de los conductores, la topografía del terreno y algunas características del rayo (polaridad, multiplicidad y ángulo de aproximación). Esto se hace considerando también otros modelos de enlace distintos al que se propone usar.

En el Capítulo **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se presentan las conclusiones de la tesis, así como las contribuciones y recomendaciones para trabajos futuros.

Al final del documento se incluye la bibliografía así como un artículo que contiene los apartes más importantes del presente trabajo de tesis.



# 2

## ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE

---

En la literatura científica se pueden encontrar diversas aproximaciones al proceso de enlace del rayo con las líneas de transmisión y simplificaciones que, en determinadas condiciones y con alguna controversia, ayudan a evaluar el desempeño de las líneas ante este fenómeno natural. En el desarrollo de estas propuestas se ha trabajado con la Teoría electromagnética, relaciones entre las diferentes etapas de la descarga, datos de campo, ensayos en laboratorio y simulaciones computarizadas.

En este capítulo se presenta una breve introducción a la física del rayo, con un vistazo rápido a los parámetros que se aplican en ingeniería y, además, se exponen los modelos de enlace más relevantes, comparándolos en cuanto a su uso para determinar el punto de impacto en las líneas de transmisión.

### 2.1 Introducción al fenómeno del rayo

La descarga eléctrica atmosférica (DEAT) es un fenómeno natural que consiste en un impulso de alta corriente con una duración de unas pocas millonésimas de segundo. Se trata de un fenómeno climático tanto por el ambiente donde ocurre como por las condiciones que lo originan. Son comúnmente conocidas como “rayos”, siendo la predicción del momento y lugar de impacto de éstos, así como la intensidad de sus parámetros, difíciles de predecir. No obstante, el desarrollo investigativo en Colombia ya permite predecir los rayos con más de 90% de certeza y hasta con media hora de anticipación.

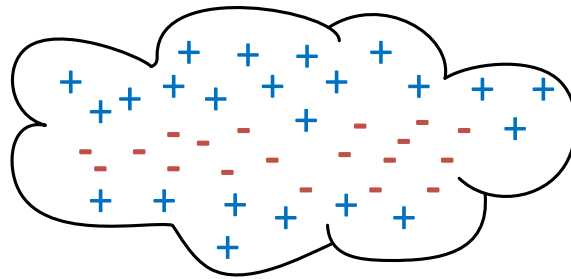
Muchos rayos contienen dos o más descargas individuales que ocurren por el mismo camino, destacándose que la primera descarga presenta, por lo general, mayor severidad que las subsecuentes (llamados *strokes*).

Los rayos constituyen fenómenos de muy corta duración, pero se puede afirmar que no es un fenómeno instantáneo. Los rayos empiezan en una nube (o en tierra) y progresan a una tasa observable (y medible) hacia su destino final.

## 2.1.1 Formación y evolución de las descargas eléctricas atmosféricas

### 2.1.1.1 Carga eléctrica en las nubes

Los rayos se suscitan ante la formación de altas concentraciones de carga eléctrica en las capas de la atmósfera inmediatamente inferiores a la estratosfera, es decir, a alturas entre 5 y 12 km, lo cual genera grandes potenciales entre las nubes o entre las nubes y la tierra. Hoy en día, está aceptado que una nube de tormenta presenta una constitución tripolar; es decir, dentro de la nube coexisten una región de carga negativa en el centro, una región de carga positiva encima de ella y una segunda región, menor, de carga positiva por debajo de aquella [17, 18].



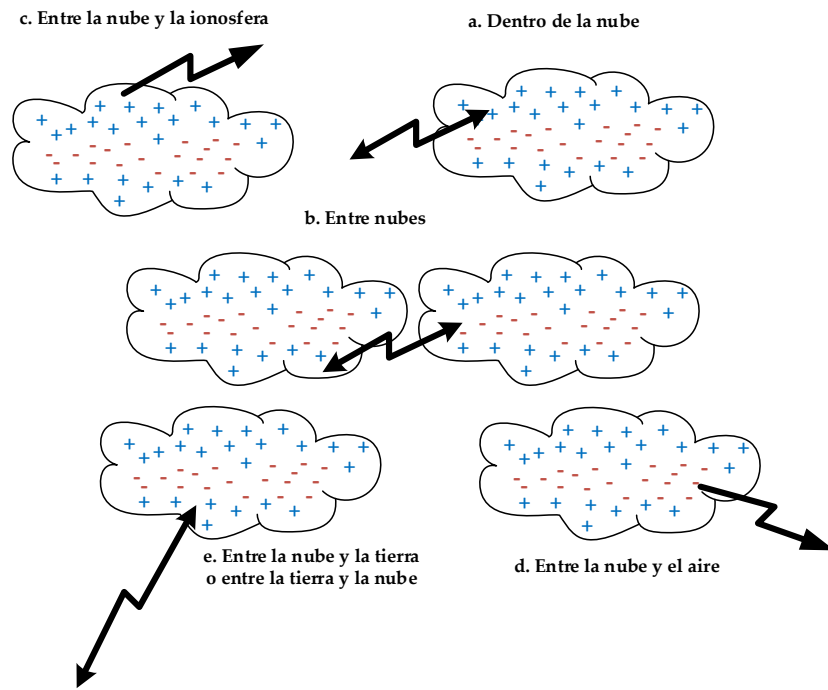
**Figura 2-1.** Distribución tripolar de carga en las nubes de tormenta

### 2.1.1.2 Clasificación de las descargas eléctricas atmosféricas

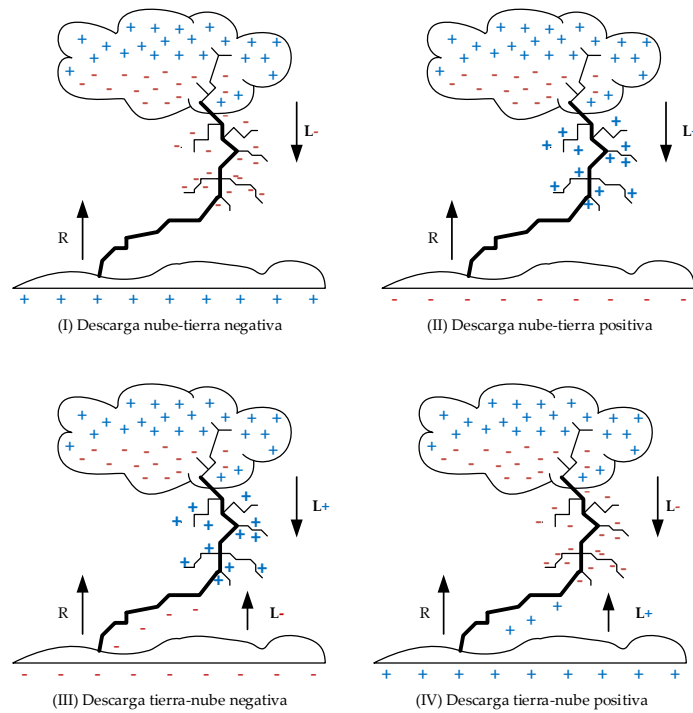
Los rayos se pueden definir como transferencias de carga eléctrica que producen altas corrientes, transformando la energía eléctrica en lumínica (relámpago) y en sonora (trueno). De acuerdo con la dirección de transferencia de carga, los rayos pueden clasificarse en [19] (ver Figura 2-2):

- a. Dentro de la nube
- b. Entre nubes
- c. Entre la nube y la ionosfera
- d. Entre la nube y el aire
- e. Entre la nube y la tierra o entre la tierra y la nube

Los rayos nube-tierra son los más estudiados porque afectan de forma directa a la actividad humana. De acuerdo con Berger (1978), este tipo de rayos se clasifican en cuatro categorías en función de la dirección de propagación y polaridad de la carga transferida [20, 21] (ver Figura 2-3).



**Figura 2-2.** Clasificación de las descargas eléctricas atmosféricas (Adaptado de [19])

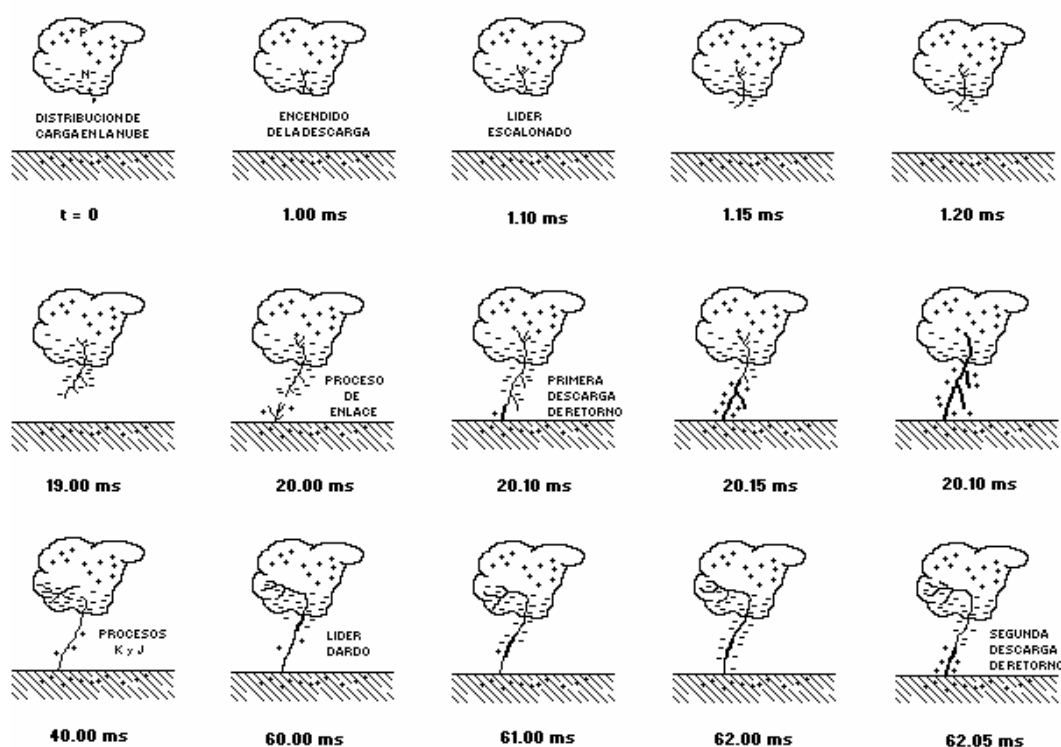


**Figura 2-3.** Tipos de descargas entre nube y tierra (Adaptado de [19])

### 2.1.1.3 Proceso de las descargas nube-tierra

Los rayos descendentes nube-tierra son, con frecuencia, los causantes de las salidas de servicio de los sistemas eléctricos y, por consiguiente, la base de las teorías de apantallamiento de líneas aéreas y subestaciones. En la [Figura 2-4](#) se muestran las etapas del proceso completo de la descarga eléctrica atmosférica negativa nube-tierra [20]:

1. Encendido de la descarga (*Preliminary Breakdown*)
2. Líder escalonado (*Stepped leader*)
3. Proceso de enlace (*Attachment process*)
4. Primera descarga de retorno (*First Return stroke*)
5. Procesos K y J (*K and J processes*)
6. Líder dardo (*Dart Leader*)
7. Descargas subsecuentes (*Subsequent strokes*)



**Figura 2-4.** Evolución de una descarga eléctrica atmosférica nube-tierra negativa<sup>19</sup>

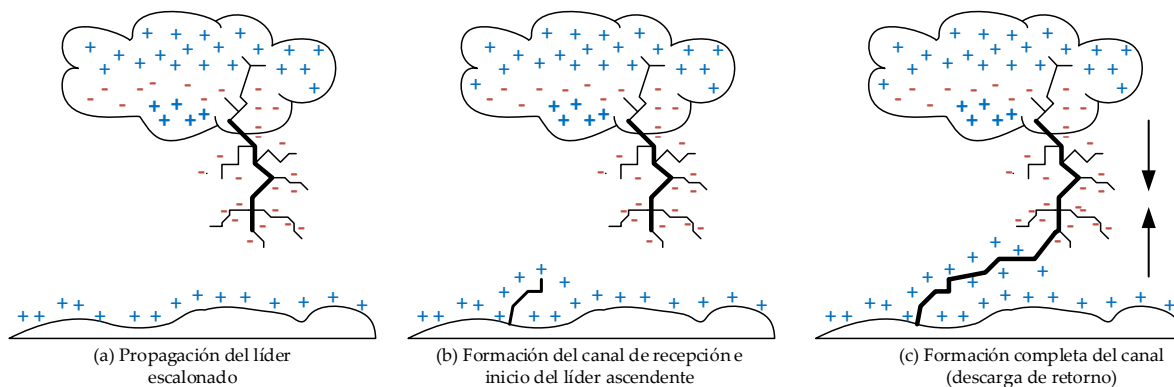
<sup>19</sup> Tomado de 22. Torres, H., *El Rayo: Mitos, leyendas, ciencia y tecnología*. 2002, Bogotá DC, Colombia: Editorial UNIBIBLOS.

Estos rayos se producen cuando la carga eléctrica se transfiere entre una nube y el suelo. Cada desplazamiento de carga produce una descarga que dura una fracción de segundos. A veces se presentan varias descargas para poder equilibrar la carga eléctrica presentada “*strokes*”, lo que parece un parpadeo dentro del rayo [23]. A nivel global, los rayos descendentes negativos tienen el 90% de probabilidad de ocurrencia; sin embargo, en la zona central andina de Colombia y durante cierta época del año se ha demostrado<sup>20</sup> que las descargas eléctricas atmosféricas positivas (Tipo II) pueden alcanzar el 100% del total de rayos nube-tierra [22].

El impacto de un rayo en el terreno o en alguna estructura presente está determinado por las tres primeras etapas, por lo que, para el análisis de protección contra rayos solo éstas se consideran. Además, la tercera etapa (proceso de enlace), a su vez, consta de tres etapas [19]:

- Inicio y propagación de *streammers*<sup>21</sup>
- Transición de *streammers* al líder y su propagación y
- Conexión entre el líder descendente y el líder ascendente

En el análisis de la protección contra rayos, sólo se considera esta última etapa de conexión entre líderes mediante el concepto de **Distancia de impacto** (*Striking distance*), razón por la cual, en esta tesis se hará énfasis en los modelos de enlace del rayo con las líneas de transmisión.

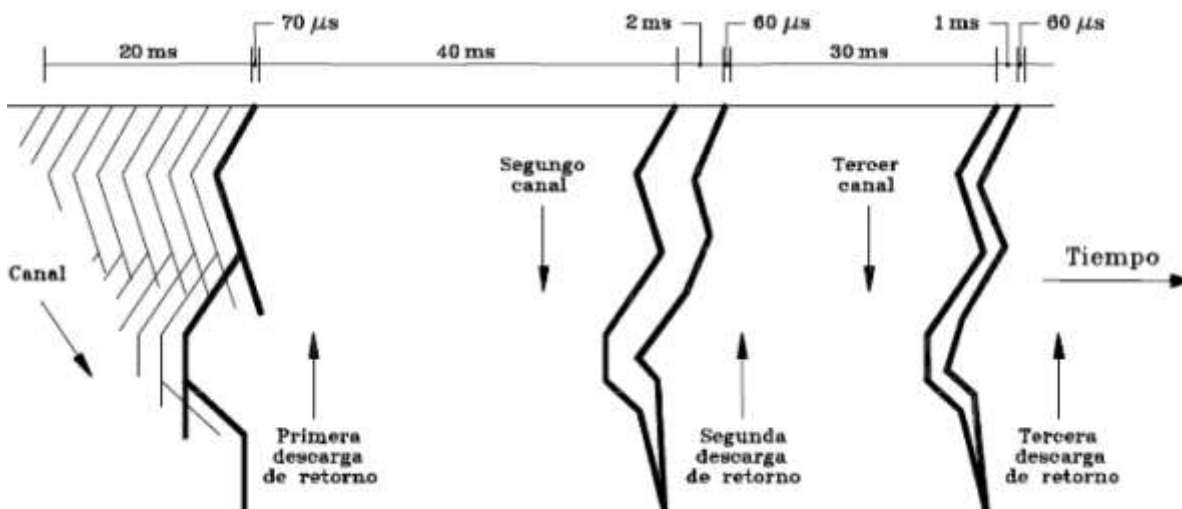


**Figura 2-5.** Evolución de la descarga (simplificada)

<sup>20</sup> Por medio de análisis experimentales.

<sup>21</sup> *Streammers* en inglés. Se trata de canales eléctricos de baja energía, ramificados o en forma de filamentos que se producen ante la presencia de un campo eléctrico alto.

El enlace del rayo con las estructuras en tierra puede resumirse así [24]: Ante la ionización del aire, se inicia un camino que lleva un primer flujo de carga hacia capas más bajas, el cual se conoce como Líder. Éste avanza vertiginosamente, con una pausa del orden de millonésimas de segundo mientras la carga transferida desde la nube se acumula y se forma otro camino ionizado para un nuevo avance del mismo. Debido a estos avances y reposos que se presentan, el primer flujo de carga es denominado líder escalonado (ver Figura 2-5 (a)). Durante su viaje hacia el terreno, el líder escalonado se divide, produciendo así la estructura geométrica ramificada hacia abajo que se observa comúnmente en las tormentas. En su avance, a medida que el líder se acerca al suelo, su gradiente eléctrico aumenta, produciendo así un canal plasmático de recepción que puede emerger desde la superficie de la tierra o de un objeto a cierta altura (ver Figura 2-5 (b)). Esto se debe a que el campo eléctrico en objetos puntiagudos en tierra o alrededor de irregularidades de la misma, aumenta hasta exceder el valor crítico en aire, lo cual, inicia una serie de descargas ascendentes desde estos puntos, conocidas como líderes ascendentes. Cuando uno de los líderes ascendentes se logra enlazar con el líder descendente se produce un proceso de conexión en el cual la punta del líder es puesta al potencial del suelo. Una vez este camino a tierra se cierra eléctricamente, la carga se desplaza a una velocidad vertiginosa, produciendo así la Descarga de retorno que se propaga continua y ascendentemente a través del canal. Esta descarga se caracteriza por su gran luminosidad y velocidad de propagación; por lo que se considera como la etapa más energética del rayo (ver Figura 2-5 (c)).



**Figura 2-6.** Reproducción del proceso completo de la descarga eléctrica

Como se puede apreciar en la [Figura 2-6](#), a través del canal ionizado que deja el líder escalonado se pueden generar nuevos flujos de carga hacia abajo (líderes rápidos) que al golpear la tierra producen descargas de retorno menos energéticas que la primera (descargas subsecuentes) [\[24\]](#).

#### **2.1.1.4 El trueno**

El trueno es el sonido que alerta sobre la ocurrencia de una descarga eléctrica atmosférica. Se trata de una señal acústica generada por un canal de aire caliente que se expande rápidamente: El aire caliente que se encuentra en el canal de descarga se expande formando una onda de choque que se transforma en energía acústica. A partir del trueno es posible obtener información sobre la localización, orientación y magnitud de un rayo. El sonido del trueno es percibido por un observador posteriormente a la percepción del destello luminoso, por tanto, entre mayor es el tiempo de retardo entre ambas percepciones mayor es la distancia entre el observador y el sitio donde impactó el rayo. Todos, el líder escalonado, los líderes rápidos y las descargas de retorno contribuyen a la formación del trueno.

#### **2.1.2 Parámetros de las descargas eléctricas atmosféricas**

Algunos parámetros del rayo resultan de gran interés debido a su influencia en el valor de las sobretensiones en las líneas de transmisión, a saber: la forma de onda de la corriente de la descarga, el valor máximo de la corriente<sup>22</sup> para la descarga de retorno y la polaridad. A continuación, se describen brevemente algunos de éstos parámetros, mientras que otros se exponen en el apartado [3.1](#) del presente documento.

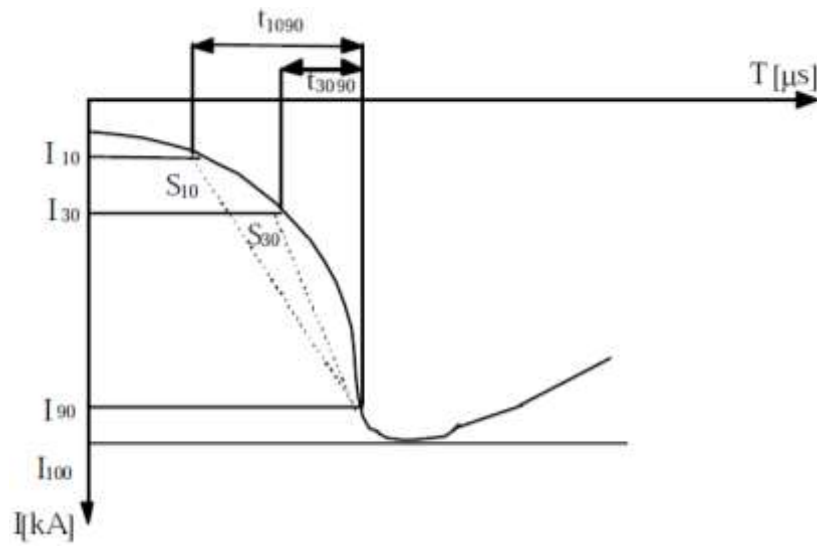
##### **2.1.2.1 Forma de onda de la corriente**

De forma general, la corriente de la descarga se caracteriza por alcanzar rápidamente su valor pico luego del cual empieza a decaer a una velocidad menor. La forma de onda de esta se encuentra caracterizada por su valor pico,  $I_p$  ( $p=10, 30, 90, 100$ ), el tiempo de frente de onda,  $t_f$ , y el tiempo al valor medio,  $t_c$ . El tiempo de frente de onda es el que tarda la onda en ir del 10% al 90% del valor pico, mientras el tiempo al valor medio es aquel en el cual la corriente de descarga disminuye al 50% del valor pico o cresta [\[25\]](#).

---

<sup>22</sup> Corriente pico o de cresta.

Se establece una forma de onda normalizada para la corriente de la descarga, descrita por su tiempo a cresta y su tiempo a valor medio, medidos en la cola como se observa en la [Figura 2-7](#), donde se ilustra una onda de corriente de rayo normalizada.  $T_{1090}$  es el intervalo de tiempo entre el 10% y el 90% de la corriente pico de una descarga, y análogamente  $T_{3090}$  es el intervalo entre el 30% y el 90% de la corriente pico [26].



**Figura 2-7.** Forma de onda (normalizada) de la corriente del rayo según CIGRÉ [13]

Los parámetros de la corriente de descarga siguen un comportamiento aleatorio que, según lo concertado en la comunidad científica, responde a una distribución tipo log-normal (CIGRÉ), tal como se detalla en el numeral 3.1.3 del presente documento.

Cabe destacar que las características de la corriente suelen ser diferentes cuando el objeto que es golpeado sobresale de forma excesiva del suelo ya que el mecanismo de descarga es diferente. En casos como este, el líder no desciende de la nube sino del objeto que se encuentra a gran altura<sup>23</sup> [27].

<sup>23</sup> Algunas mediciones hechas en el edificio *Empire State*, uno de los más altos del mundo, ponen esto de manifiesto ante la obtención de valores de corriente e intervalos de tiempo diferentes a los normalizados.



### 2.1.2.2 Polaridad

Los rayos pueden presentar polaridades positivas, negativas o ambas en una misma descarga (onda bipolar). Relacionando este aspecto con las estructuras susceptibles de ser impactadas por el rayo, y de conformidad con las topologías de las descargas nube-tierra (ver [Figura 2-3](#)), las siguientes características pueden atribuirse [\[2\]](#):

- I. **Rayo descendente negativo.** Es común en estructuras de altura inferior a 100 m y presenta una corriente media de 33 kA, aproximadamente.
- II. **Rayo ascendente positivo.** Posee magnitudes de corriente de 1.2 a 2.2 veces las que presenta el rayo descendente negativo. Alrededor del 14% de las DEAT son de este tipo.
- III. **Rayo descendente positivo.** Constituye la minoría de los rayos, suelen ocurrir en la fase de disipación de una tormenta.
- IV. **Rayo ascendente negativo.** Predominan en las construcciones muy altas y presentan una corriente media inferior a 25 kA.

Se ha identificado que el 90% de los rayos que “caen” a tierra son negativos y que menos del 10% son positivos<sup>24</sup>; sin embargo, estos últimos resultan de interés dado que tanto la corriente pico como la carga total transferida pueden ser considerablemente mayores que la de los rayos con polaridad negativa, encontrándose registrados picos de corriente en el rango de 200 a 300 kA [\[20, 21\]](#).

Es característica de los rayos positivos contener comúnmente una única descarga de retorno seguida de un período de corriente continua. Por lo general, los rayos positivos a tierra tienden a ocurrir durante las tormentas de invierno y se destaca un aumento en su probabilidad de ocurrencia con el aumento de la altura del terreno, lo cual quiere decir que entre más cerca se encuentre la nube de la tierra existe una mayor posibilidad que se dé una descarga atmosférica positiva [\[28\]](#). Este es un aspecto interesante a la hora de querer evaluar su incidencia sobre líneas de transmisión que discurran por terrenos montañosos y en regiones donde, además, el porcentaje de registros supere el 10% [\[22\]](#).

---

<sup>24</sup> Estos porcentajes varían en el territorio colombiano.

### **2.1.2.3 Ángulo de incidencia**

El ángulo de incidencia es aquel con el cual se aproxima el líder descendente, respecto a la línea vertical, con cualquier punto terminal. En muchos casos no es correcto considerar que todos los rayos inciden verticalmente, por ejemplo en el cálculo de apantallamiento de líneas aéreas de transmisión, ya que esto puede generar errores en la tasa de salidas [29]. Por ende, resulta útil conocer la probabilidad de ocurrencia de un ángulo de inclinación determinado. Este tema se desarrolla con detalle en el apartado 3.5 del presente documento.

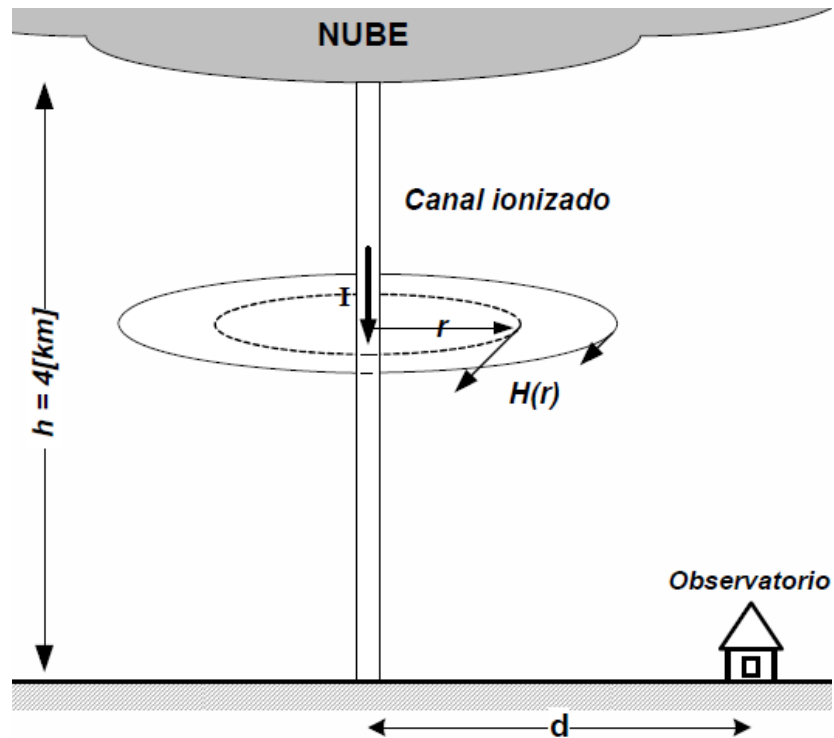
### **2.1.3 Medición de las descargas eléctricas atmosféricas**

Las mediciones de las descargas eléctricas atmosféricas son recopiladas y analizadas en términos estadísticos, lo cual permite establecer probabilidades de ocurrencia de un tipo u otro de descargas.

Existen estaciones encargadas de detectar las descargas atmosféricas y medir algunos de sus parámetros mediante la recepción de las ondas electromagnéticas emitidas por estas. La principal información recolectada por estas estaciones corresponde a: ubicación del punto de impacto, momento de ocurrencia del impacto (fecha y hora), amplitud de la onda [kA] y número de arcos que componen la descarga. Por tanto, para el estudio de las características de este fenómeno en un área determinada, se debe llevar a cabo un monitoreo permanente de esta mediante varias estaciones (ubicadas estratégicamente) que suministren la información necesaria para un posterior procesamiento [23].

Para la medición de los parámetros de un rayo debe considerarse que este es una corriente eléctrica variable, razón por la cual produce un campo electromagnético irradiado. Dicho campo tiene una frecuencia que se ubica en la gama de las ondas de gran amplitud, por lo cual es difícil generar un blindaje para evitar su acción sobre sistemas que presentan lazos o bucles de conducción. Sin embargo, el campo producido por una descarga permite una posibilidad de medir los parámetros de la misma a partir de su captación y registro con una base de tiempo exacta que permita discriminar variaciones en una décima de microsegundo. Para modelar el campo electromagnético generado, se establece que la antena desde la cual este parte es el canal ionizado, el cual para las descargas nube-tierra puede ser representado como un conductor rectilíneo de gran longitud aproximadamente vertical.

De acuerdo a la aproximación anterior, se puede considerar correcto que para una distancia,  $d$ , suficientemente alejada del lugar de impacto del rayo, la intensidad de campo magnético está dada por la ley de Ampere. Esta situación se ilustra en la Figura 2-8 [30], en la cual se observa que si se presenta una descarga vertical el campo electromagnético generado será horizontal.



**Figura 2-8.** Campo magnético generado por la corriente de la descarga

Es importante anotar que debido al comportamiento del desplazamiento de las nubes, los campos eléctricos producidos pueden crecer de forma que ocasionan descargas verticales, horizontales o inclinadas, en cualquier dirección con respecto al plano horizontal donde se encuentran las estaciones observadoras. Por consiguiente y con el fin de poder identificar el tipo de descarga que ocurre, se debe disponer como mínimo de tres elementos receptores, orientados de acuerdo con un sistema coordenado, de forma que se pueda captar simultáneamente la información de cada uno de ellos, la cual posteriormente se procesa para obtener una resultante.

## 2.2 Apantallamiento en líneas de transmisión

### 2.2.1 Retrospectiva

La investigación acerca de la incidencia de los rayos en una línea de transmisión ha contado con muchos aportes a lo largo de los años. La incidencia directa incluye los flameos por fallas de apantallamiento y los flameos inversos. Típicamente, el análisis de la falla de apantallamiento se ha hecho con base en dos modelos de enlace del rayo con las estructuras en tierra<sup>25</sup>: El Modelo Electrogeométrico<sup>26</sup> (EGM) y el Modelo de Progresión del Líder Escalonado<sup>27</sup> (LPM). El primero, empírico por naturaleza, se basa en el concepto de Distancia de impacto<sup>28</sup>, la cual se define como la separación espacial que existe entre la punta del líder descendente y el objeto a ser impactado por el rayo, en el instante en que se ha iniciado un líder ascendente en dicho objeto (puede ser una estructura o el terreno mismo). El LPM, con mayor orientación a la física del rayo, considera criterios de inicio del líder ascendente en la simulación paso a paso del desarrollo de los canales líderes. Para determinar de manera simplificada el punto de impacto del rayo en la línea, el LPM emplea el concepto de Radio de atracción<sup>29</sup>, definido como el radio de “captura” en el cual se interceptan los líderes descendente y ascendente del rayo. Ambos, el EGM y el LPM comprenden, cada uno, un conjunto de versiones resultantes de los aportes que han hecho diferentes investigadores a lo largo de los años. Actualmente, al conjunto de versiones del LPM se le denomina Modelos Genéricos [31].

Hacia finales de la segunda guerra mundial, una versión rudimentaria del EGM fue desarrollada por R.H. Golde, quien fue pionero en sugerir una relación entre la corriente pico de la descarga de retorno y la carga eléctrica del líder del rayo. Golde basó su investigación en la evaluación del campo eléctrico entre la punta del líder descendente y el objeto a ser impactado por el rayo; también propuso una fórmula para establecer el área de exposición de una línea de transmisión [32]. El número de impactos de rayos a la línea podía calcularse a partir de dicha área.

A principios de los años 50, se introdujo el Método de la Onda Viajera con el objeto de calcular sobretensiones en las líneas de transmisión [33]. En la siguiente década,

---

<sup>25</sup> Estos modelos permiten discriminar el punto de impacto del rayo sobre la línea.

<sup>26</sup> *Electric-Geometric Model* EGM, por sus siglas en inglés.

<sup>27</sup> *Leader Progression Model* LPM, por sus siglas en inglés.

<sup>28</sup> *Striking distance*, en el argot técnico inglés. En español, se conoce también como Distancia crítica.

<sup>29</sup> *Attractive radius* en el lenguaje técnico de habla inglesa.

surgieron los aportes que desarrollaron el EGM tal como se conoce hoy en día. C.F. Wagner propuso su Modelo Simplificado del Último Paso de la Descarga [34, 35]; F. Young y sus colaboradores demostraron que el ángulo de apantallamiento de una línea debía disminuir con el aumento de la altura de la torre [36, 37]; E. Whitehead y sus asociados propusieron una distribución del ángulo de aproximación de la descarga<sup>30</sup> [38, 39]; J.G. Anderson demostró el concepto simplificado de la incidencia de rayos en una línea de transmisión, asumiendo que ésta proyecta una “sombra eléctrica” sobre el suelo y que, a partir del ancho de la sombra, se puede determinar el número de impactos a la línea [40]. Es importante anotar que Anderson fue el pionero en aplicar las técnicas de simulación de Montecarlo en la determinación del número de impactos a las líneas [41], siguieron esta propuesta otros investigadores [42, 43]. Como alternativa a Montecarlo, se destaca el Método de Chowdhuri [44].

A finales de los años 80, A.J. Eriksson presentó una expresión similar a la de Anderson (1968), pero más precisa, producto de la combinación de datos empíricos con un nuevo modelo analítico. Eriksson modificó el EGM tradicional al introducir el concepto de radio de atracción. Inicialmente, este modelo se conoció como el Modelo Electrogeométrico Mejorado<sup>31</sup> (IEGM) y, hoy en día, está considerado como precursor de los modelos de enlace orientados a la física del fenómeno del rayo [45, 46].

En la década del 90 surge el LPM tal como se conoce en la actualidad. F. Rizk presentó una propuesta para evaluar la exposición de conductores horizontales a los impactos directos de los rayos [47]; L. Deller y E. Garbagnati, fundamentados en la física de la descarga eléctrica sobre grandes espacios de aire, introdujeron por medio del LPM la simulación computarizada de impactos de rayos a líneas de transmisión [48, 49]. Al final de la década, A. Phillips desarrolló un programa para analizar los factores involucrados en la aproximación de un líder del rayo hacia una línea de transmisión, considerando tres criterios diferentes para modelar el desarrollo del líder ascendente [50].

En lo que va corrido del siglo XXI se han presentado nuevos métodos que, mediante simulaciones computarizadas del LPM, permiten evaluar la incidencia de los rayos en las líneas de transmisión [51, 52]. Entre los aportes más recientes

---

<sup>30</sup> En el trabajo de Young se consideraron descargas verticales solamente.

<sup>31</sup> *Improved Electrogeometric Model* IEGM en el argot técnico de habla inglesa.

sobresale una versión en 3D del LPM que tiene en cuenta los efectos de la flecha de los conductores y cables de guarda así como la presencia de árboles en la cercanía de la línea [53]; también se destaca una versión del LPM que, basada en la Teoría de fractales, considera la tortuosidad y ramificaciones del rayo [54-56].

En lo referente al flameo inverso, como opciones al Método Simplificado de los dos Puntos [11, 57], se estima la tasa de salidas por métodos analíticos [58, 59] o mediante simulaciones en EMTP<sup>32</sup>, el cual, considera los transitorios que tienen lugar durante el proceso de las descargas retroactivas, incluyendo la respuesta de los elementos de las líneas [60, 61].

Es importante destacar que hoy en día los experimentos realizados con modelos a escala se proyectan como una opción prometedora en el campo de la investigación de la incidencia del rayo en las líneas de transmisión. Estas pruebas se apoyan en las similitudes que, con respecto al mecanismo de rompimiento de la rigidez dieléctrica del aire, existen entre los rayos y las descargas generadas artificialmente. En particular, se destacan dos autores: Mikropoulos y Grzybowski. El primero sustenta el comportamiento estocástico de la distancia de impacto [62] y el segundo establece relaciones entre la distancia de impacto a un conductor, su altura sobre el suelo y la polaridad de la descarga [63].

## **2.2.2 Ubicación del cable de guarda**

### **2.2.2.1 Ángulo de apantallamiento**

En el corredor de una línea de transmisión, el punto de impacto de un rayo puede ser un cable de guarda, un conductor de fase, un apoyo o incluso el suelo. El propósito del cable de guarda es interceptar los rayos para que éstos no terminen en el conductor de fase, por lo que, se puede decir que el punto de impacto de un rayo sobre una línea apantallada es una variable aleatoria<sup>33</sup> que puede relacionarse con la posición del cable de guarda en el apoyo (torre o poste). Luego, es válido definir el apantallamiento de una línea como la ubicación<sup>34</sup> adecuada del cable de guarda para reducir el número de interrupciones en el servicio provocadas por las descargas eléctricas atmosféricas.

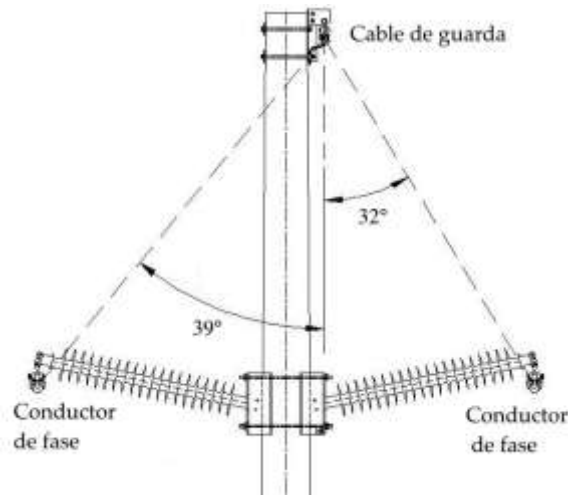
---

<sup>32</sup> *Electromagnetic Transients Program* EMTP en idioma inglés. Inicialmente fue desarrollado por el EMTP Development Coordination Group of the BPA. Actualmente, su desarrollo está liderado por el Canadian/American EMTP User Group, el European EMTP-ATP Users Group e.V. (EEUG) y el Japanese ATP User Group (JAUG).

<sup>33</sup> El rayo es un fenómeno natural aleatorio.

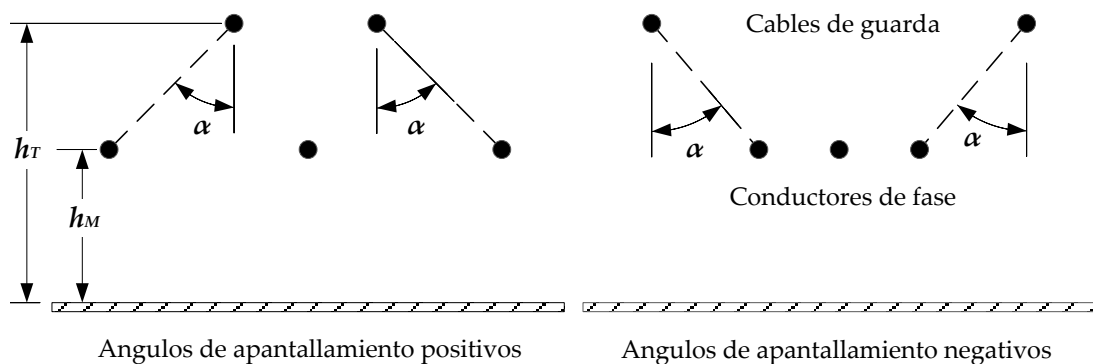
<sup>34</sup> Se refiere a su altura desde el suelo y a la distancia horizontal respecto de los conductores de fase.

La posición del cable de guarda respecto de los conductores de fase, queda determinada por el Ángulo de apantallamiento<sup>35</sup>, el cual se define como el mayor ángulo que forman la vertical en el cable de guarda y la recta que une éste con los conductores de fase, tal como se muestra en la Figura 2-9, donde el valor de este ángulo es  $39^\circ$ .



**Figura 2-9** Ilustración del ángulo de apantallamiento

El ángulo de apantallamiento puede ser positivo o negativo. En la Figura 2-10 se muestra el criterio de posición del cable de guarda para determinar el signo de dicho ángulo<sup>36</sup>. En esta figura,  $h_T$  y  $h_M$  representan las alturas de ubicación de los cables de guarda y conductores de fase, respectivamente.



**Figura 2-10** Signo del ángulo de apantallamiento

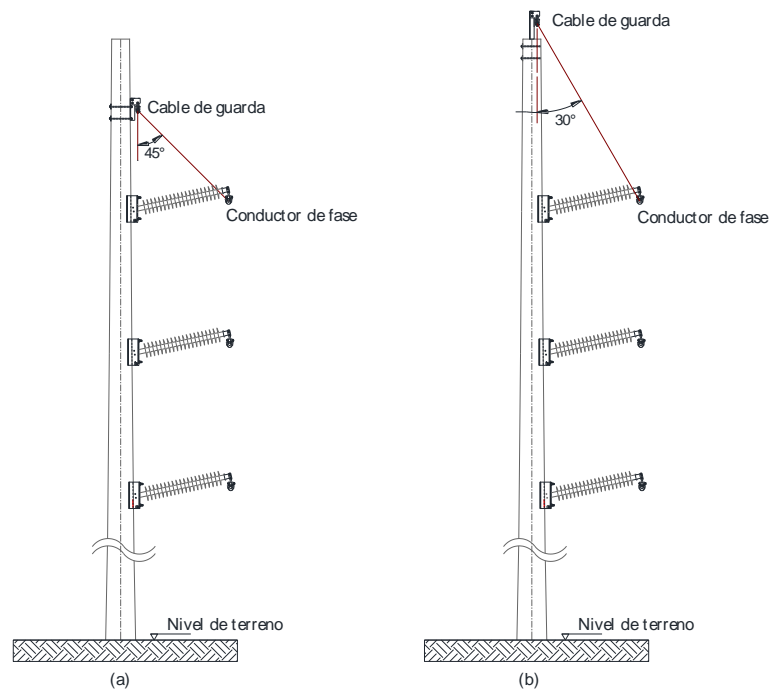
<sup>35</sup> *Shielding angle* en idioma inglés. En español, también se conoce como ángulo de protección.

<sup>36</sup> En la práctica se emplean ángulos de apantallamiento negativos que no sobrepasan los  $-10^\circ$ .

Existen varios métodos para ubicar el cable de guarda y así determinar el ángulo de apantallamiento; cada uno de ellos proporciona una “zona de protección” diferente contra los rayos; sin embargo, todos sugieren que este cable se sitúe por encima de los conductores de fase. Los métodos se pueden agrupar en dos categorías: Clásicos y Modernos.

### 2.2.2.2 Métodos clásicos

Los métodos clásicos para ubicar el cable de guarda tienen sus inicios en la primera mitad del siglo XX, son sencillos de implementar y se basan en criterios geométricos sin más fundamentos teóricos que los resultados obtenidos de su aplicación. Estos métodos se pueden clasificar en dos grupos [64]: Métodos basados en el ángulo de apantallamiento y Métodos basados en arcos circulares.



**Figura 2-11** Ubicación del cable de guarda según Charles (a) y Wagner (b)

Los métodos basados en el ángulo de apantallamiento permiten establecer áreas de protección en forma cónica, delimitadas por líneas rectas que están definidas por un ángulo de apantallamiento. Se destacan dos criterios: Ángulo de apantallamiento de 45° (Criterio de Charles) y ángulo de apantallamiento de 30° (Criterio de Wagner & McCann) [65]. En la [Figura 2-11](#) se ilustra la aplicación de estos criterios: Nótese que el primero no es muy exigente y permite ubicar el cable de guarda a una altura relativamente baja, esto puede aumentar el riesgo de falla

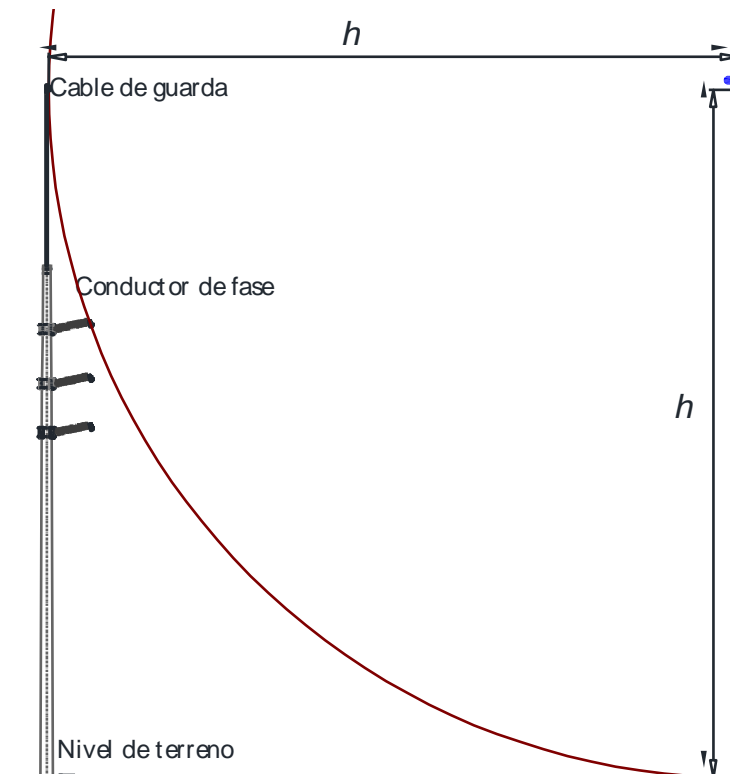


del apantallamiento; mientras que el segundo criterio requiere el uso de un herraje de extensión para lograr una altura que permita obtener el ángulo de apantallamiento sugerido.

**Nota:** Antes de la investigación hecha por Young y sus asociados, en las líneas de transmisión con torres alrededor de los 24 m de altura, se empleaban exitosamente ángulos de protección del orden los 30° [65].

Los métodos basados en arcos circulares permiten establecer áreas de protección delimitadas por arcos circulares en vez de líneas rectas. Se destacan dos criterios:

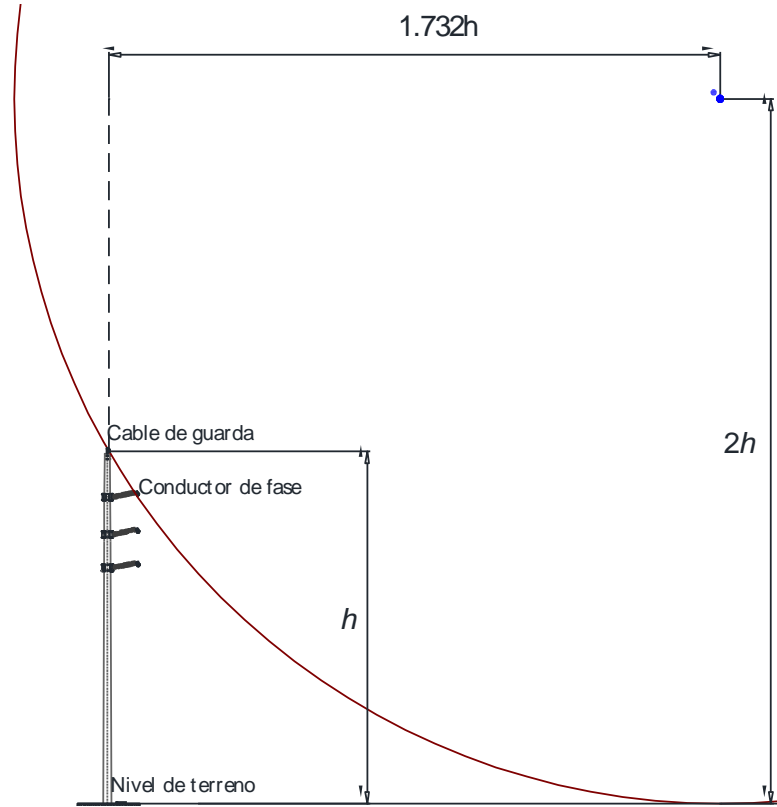
- ❖ **Criterio de Schwaiger** [66] - Propone una zona de protección delimitada por un cuarto de circunferencia con radio igual a la altura del cable de guarda.
- ❖ **Criterio de Langrehr** - Propone una zona de protección delimitada por un cuarto de circunferencia con radio igual al doble de la altura del cable de guarda.



**Figura 2-12** Ubicación del cable de guarda según el criterio de Schwaiger

En la [Figura 2-12](#) se muestra la aplicación del criterio de Schwaiger, mientras que en la [Figura 2-13](#) se ilustra el de Langrehr. Es de notar que, el primero requiere un

herraje de extensión poco práctico; sin embargo, se resalta el hecho que este criterio es precursor del Método de las Esferas Rodantes<sup>37</sup> (RSM), el cual, se usa en la actualidad para la protección de edificaciones [67].



**Figura 2-13** Ubicación del cable de guarda según el criterio de Langrehr

Al resolver para  $h$  las ecuaciones (2-1) y (2-2), correspondientes a Schwaiger y Langrehr respectivamente, se obtiene la altura de ubicación del cable de guarda:

$$h = (x_c - h)^2 + (y_c - h)^2 \quad (2-1)$$

$$4h^2 = (x_c - h\sqrt{3})^2 + (y_c - 2h)^2 \quad (2-2)$$

donde,  $x_c$  e  $y_c$  corresponden a la abscisa y ordenada, respectivamente, del punto de ubicación del conductor de fase que se encuentre a mayor altura sobre el suelo.

<sup>37</sup> The Rolling Sphere Method RSM, por sus siglas en inglés.

### 2.2.2.3 Métodos modernos

Los métodos modernos para ubicar el cable de guarda tienen sus inicios en la segunda mitad del siglo XX y están basados en modelos teóricos y experimentales del fenómeno del rayo, permitiendo ubicar el cable de guarda considerando una tasa específica de salidas de la línea.

En estos métodos, el posicionamiento del cable de guarda se hace teniendo en cuenta la probabilidad de que se produzca una falla del apantallamiento. La premisa es que la carga eléctrica espacial contenida en el líder del rayo está relacionada con la magnitud de la corriente de la descarga. El ángulo de apantallamiento y el valor de dicha corriente determinarán la probabilidad de que un rayo impacte contra un conductor de fase o contra el suelo.

A cada rayo que incida sobre la línea le corresponderá una corriente pico. Existe un valor mínimo de corriente pico, requerido para producir flameo en los aisladores, que se conoce como Corriente crítica (*critical current*); también, existe un valor máximo de corriente pico, por encima del cual no habrá falla de apantallamiento, que se conoce como Corriente máxima de falla de apantallamiento (*maximum shielding failure current*).

Las descargas cuya corriente pico supere la corriente máxima de falla de apantallamiento, impactarán contra el cable de guarda o contra el suelo pero no contra el conductor de fase, en tal caso se dice que la línea está completamente apantallada para tales magnitudes de corriente pico. Los rayos con corriente pico inferior a la crítica pueden impactar contra el conductor de fase, es decir, pueden ocasionar un falla de apantallamiento; sin embargo, se espera que no causen flameo. El Apantallamiento efectivo (*effective shielding*) se logra cuando el cable de guarda intercepta a aquel rayo que posee una corriente pico superior a la crítica.

De lo expuesto hasta ahora, se deduce que existe un rango de corrientes en el cual varía la efectividad del apantallamiento de una línea. El límite inferior de este rango puede obtenerse a partir de las características eléctricas de la línea. No obstante, el cálculo del límite superior requiere de un análisis geométrico que depende del modelo de enlace del rayo (*lightning attachment model*) que se emplee en el estudio de la falla de apantallamiento.

Existen varios modelos de enlace del rayo con las LAT, unos con mayor fundamento físico que otros; pero todos se basan en el poder de atracción que puede tener un conductor o una torre sobre las descargas eléctricas atmosféricas.

Según lo mencionado en el numeral 2.2.1 y conforme con lo expuesto por Nucci [68] y Mikropoulos [69] se tiene que los modelos más usados en el diseño del apantallamiento de líneas se pueden clasificar en dos grandes grupos: Modelos Electrogeométricos (EGM) y Modelos Genéricos (GM).

En síntesis, los métodos modernos determinan el ángulo de protección con base en una aceptable Tasa de salidas de la línea por fallas de apantallamiento<sup>38</sup> (SFFOR). El cálculo de la SFFOR considera un rango de corrientes pico del rayo, que depende del nivel de aislamiento de la línea así como de su geometría.

### **2.2.3 Modelos de enlace del rayo con las líneas**

El primer paso para establecer la relación entre los rayos y las salidas de las LAT, es seleccionar un modelo que permita discriminar el punto de impacto de la descarga<sup>39</sup>. La literatura abierta presenta dos grandes opciones para resolver el asunto: EGM y GM. En este numeral se hará una descripción de estos modelos de enlace así como de su aplicación en el cálculo de la SFFOR de una LAT.

#### **2.2.3.1 Modelos Electrogeométricos**

La mayoría de los EGM se han desarrollado y validado para determinar la ubicación del cable de guarda en LAT. Sus inicios se remontan a la segunda mitad del siglo XX, cuando Wagner y Young establecieron las bases de la Teoría electrogeométrica<sup>40</sup>, la cual ha estado bajo revisión continua a lo largo de los años y ha recibido aportes importantes por parte de Whitehead, Love, Eriksson, Torres y Cooray, entre otros.

##### **2.2.3.1.1 Principios**

La explicación física en la que se fundamentan los EGM parte del proceso de enlace del rayo con las estructuras en tierra. Cuando la descarga se inicia en la parte más baja de la nube de tormenta, aparece el líder escalonado (o trazador descendente); a medida que éste se aproxima al terreno va formando un canal conductivo de cargas que transporta una porción de la carga negativa acumulada en la nube; entonces, el campo eléctrico en las estructuras sobre el terreno aumenta hasta un

---

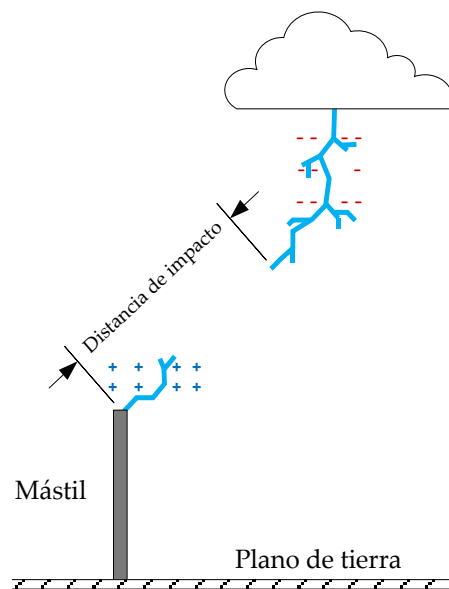
<sup>38</sup> *Shielding Failure Flashover Rate* SFFOR, por sus siglas en inglés.

<sup>39</sup> En el corredor de una línea de transmisión, el punto de impacto de un rayo puede ser un cable de guarda, un conductor de fase, un apoyo o incluso el suelo.

<sup>40</sup> Cabe anotar que esta teoría, tal como se usa hoy en día para el apantallamiento de líneas de transmisión, fue propuesta por Armstrong & Whitehead (1968).

valor crítico de disrupción, por lo que se considera que en ese instante se inicia el líder ascendente (o conector) desde la estructura que será impactada (puede ser el suelo mismo). Cuando los *streammers* que brotan de los extremos de ambos líderes logran contacto mutuo, se completa el último paso de la descarga, que se conoce como el salto final.

Observaciones experimentales y cálculos teóricos indican que durante el salto final el gradiente de potencial promedio entre la punta del trazador y la estructura puesta a tierra equivale al potencial de los *streammers*<sup>41</sup> que “puentearán” el espacio entre ambos. Asumiendo cierta similitud entre las descargas eléctricas naturales y las generadas en los laboratorios, la teoría electrogeométrica dice que cuando el líder escalonado se aproxima a una estructura y alcanza cierta distancia crítica, donde el gradiente de potencial promedio a lo largo del espacio que existe entre la punta del líder descendente y la estructura es igual al gradiente de potencial de los *streammers*, entonces se produce inmediatamente la disrupción del aire y dicha estructura será impactada por el rayo. Esta distancia crítica disruptiva se conoce como Distancia de impacto (*striking distance*) y es el concepto<sup>42</sup> básico de los EGM, tal como se ilustra en la siguiente figura:



**Figura 2-14** Proceso de conexión de los líderes del rayo

<sup>41</sup> Estos *streammers* mantienen un gradiente de potencial constante a lo largo de sus ejes.

<sup>42</sup> Útil a la hora de determinar la zona de impacto más probable en una línea de transmisión.

La siguiente, es una definición clásica de la distancia de impacto [21]: Es la distancia, existente entre el líder descendente y el objeto a ser impactado, para la cual se alcanza el “campo eléctrico crítico” requerido para causar la disrupción del aire. Dicho de otra forma, la distancia de impacto es la máxima separación donde aún se cumplen las condiciones necesarias para que se produzca el salto final. Esta última definición es la que mejor se relaciona con la denominación original de los EGM: Modelos Electrogeométricos del último paso o del salto final<sup>43</sup> (*Electro-Geometric Models of the last step*).

Como se mencionó al inicio de este numeral, la física del proceso de enlace involucra la intervención de los líderes ascendentes que emanan de las estructuras en tierra (o del suelo mismo) para conectarse con el líder descendente. Para tener en cuenta esto, la comunidad científica acepta la siguiente definición de la distancia de impacto [21]: es la distancia que existe entre el extremo del líder descendente y la estructura que será impactada por el rayo, en el instante en que se inicia el líder ascendente en dicha estructura. Así mismo, está aceptado que esta distancia depende del campo eléctrico generado por el líder escalonado, a su vez, determinado por la distribución de carga del canal del líder. Después del inicio del líder conector, la descarga de retorno viaja a través del canal del líder neutralizando dicha carga.

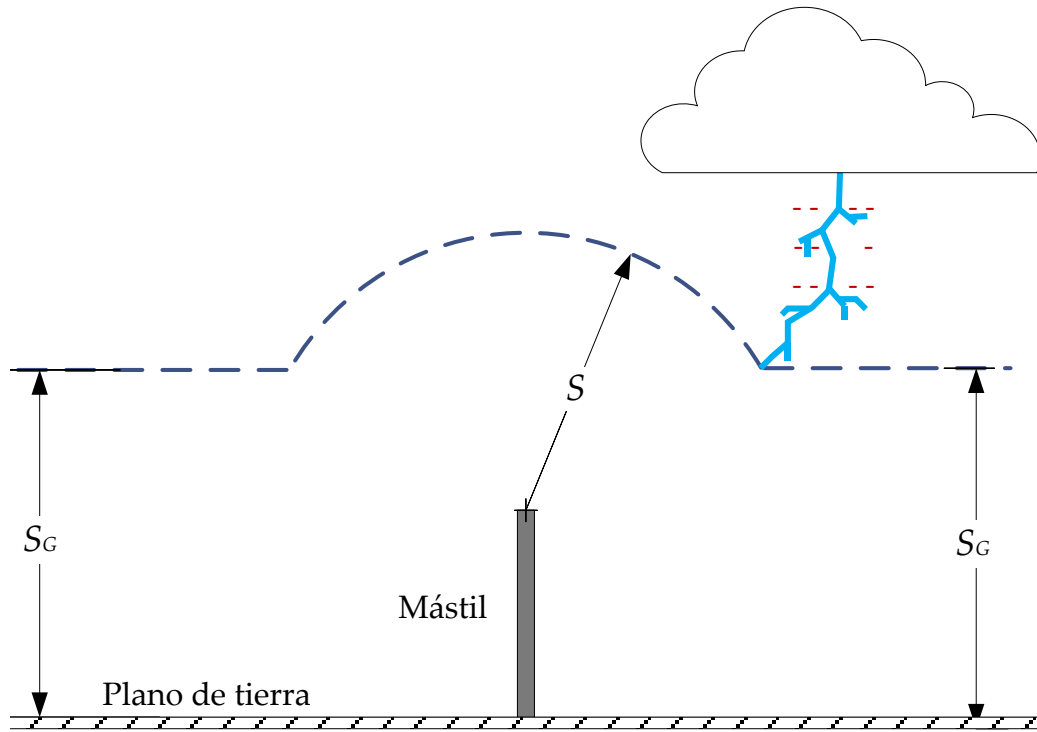
En la práctica de protección contra rayos, se acostumbra a formular el criterio para el inicio del líder ascendente en términos de la corriente pico de la descarga de retorno, medida en la base del canal del rayo. Esto requiere una relación entre la distribución de carga del líder y la corriente pico de la descarga de retorno: a mayor carga en el líder, mayor será la corriente de retorno esperada y a menor carga del líder, menor corriente de retorno se tendrá. Por lo tanto, un trazador con una corriente de retorno pequeña tiene que acercarse más a una estructura que un trazador con una corriente mayor, para que pueda producirse el enlace del rayo con dicha estructura. Entonces, se puede decir que la distancia de impacto dependerá de la corriente de la descarga. Para la mayoría de las aplicaciones de ingeniería, se acepta la siguiente relación simplificada:

$$S(I_1) = A \cdot I_1^B \quad (2-3)$$

---

<sup>43</sup> Por tener en cuenta solo esta última etapa del proceso de enlace del rayo con las estructuras en tierra.

En la expresión anterior,  $S$  [m] es la distancia de impacto e  $I_1$  [kA] es la corriente pico de la primera descarga de retorno;  $A$  y  $B$  son coeficientes empíricos que dependen tanto del punto de terminación del rayo como de la magnitud de la corriente de la descarga (Véase la [Tabla 2-1](#)).



**Figura 2-15** Concepto de distancia de impacto (crítica o de ruptura)

En general, existen dos distancias de impacto: una a la estructura,  $S$ , y una al plano de tierra,  $S_g$ . Esto se ilustra en la [Figura 2-15](#). Algunos autores consideran como obvia esta distinción, debido a que la pendiente de una descarga con electrodos punta-plano (líder descendente que se conecta con la tierra) es diferente de la pendiente de una descarga con electrodos punta-punta (líder descendente con la punta de un mástil).

Durante varios años, los miembros del *CIGRÉ Working Group 33.01* trabajaron en pruebas de laboratorio y de campo para desarrollar una fórmula que presentara el mejor ajuste a la teoría electrogeométrica:

$$S(I_1) = 2 \cdot I_1 + 30 \cdot \left(1 - e^{-\frac{I_1}{0.68}}\right) \quad (2-4)$$

La ecuación (2-4) ha sido aproximada para que fuese una expresión más sencilla de usar y, hoy en día, está aceptada por la mayoría de normas internacionales [12, 70, 71]:

$$S(I_1) = 10 \cdot I_1^{0.65} \quad (2-5)$$

Nótese que, en este caso, los parámetros de la ecuación (2-3) serían  $A=10$  y  $B=0.65$ .

**Tabla 2-1** Valores de  $A$ ,  $B$  e  $\gamma$

Modelo Electrogeométrico	$A$	$B$	$\gamma$
Wagner & Hileman (1961) [35]	14.20	0.42	1.00
Young et al. (1963) [37]	$27a$	0.32	$a$
Armstrong & Whitehead (1968) [38]	6.72	0.80	1.11
Brown & Whitehead (1969) [39]	7.10	0.75	1.11
Love (1973) [72]	10.00	0.65	1.00
Whitehead (1974) [73]	9.40	0.67	1.00
Suzuki et al.(1981) [74]	3.30	0.78	1.00
Anderson (1982) [11]	10.00	0.65	$1/b$
IEEE Working Group (1985) [57]	8.00	0.65	$1/c$
Mousa (1988) IEEE Std. 998 (1996) [75, 76]	$8d$	0.65	1.00
IEEE Std. 1243 (1997) [12]	10.00	0.65	$1/e$
IEEE Std. 1410 (2010) [71]	10.00	0.65	1.11

$a = \frac{444}{462-h}$  para  $h > 18$  m;  $a = 1$  para  $h \leq 18$  m.  $h$  es la altura del conductor.  
 $b = 0.64$  para líneas UAT, 0.8 para líneas EAT y 1 para el resto de líneas.  
 $c = 0.512$  para líneas UAT, 0.64 para líneas EAT y 0.8 para el resto de líneas.  
 $d = 1$  para conductores y 1.1 para mástiles.  
 $e = 0.36 + 0.17 \ln(43-h)$  para  $h < 40$  m,  $e = 0.55$  para  $h > 40$  m.  
EAT: *Extra High Tension*  
UAT: *Ultra High Tension*

Cada EGM emplea diferentes valores para los coeficientes  $A$  y  $B$ ; sin embargo, todos asumen que el líder descendente se desarrolla inalterado por la existencia de los objetos en el terreno (torre, conductor o el suelo mismo) hasta que alcanza la distancia crítica de uno de ellos, es decir, hasta que la distancia más corta entre la punta del trazador y el objeto es igual a la distancia de impacto asociada con el objeto. Cuando esto ocurre, el líder del rayo sigue una ruta que lo lleva a aquel objeto. Luego, para un determinado valor de corriente pico,  $I_1$ , el líder descendente impactará contra el primer objeto que encuentre a una distancia,  $S$ , de su punta. Cada rayo impactará un objeto a la vez.

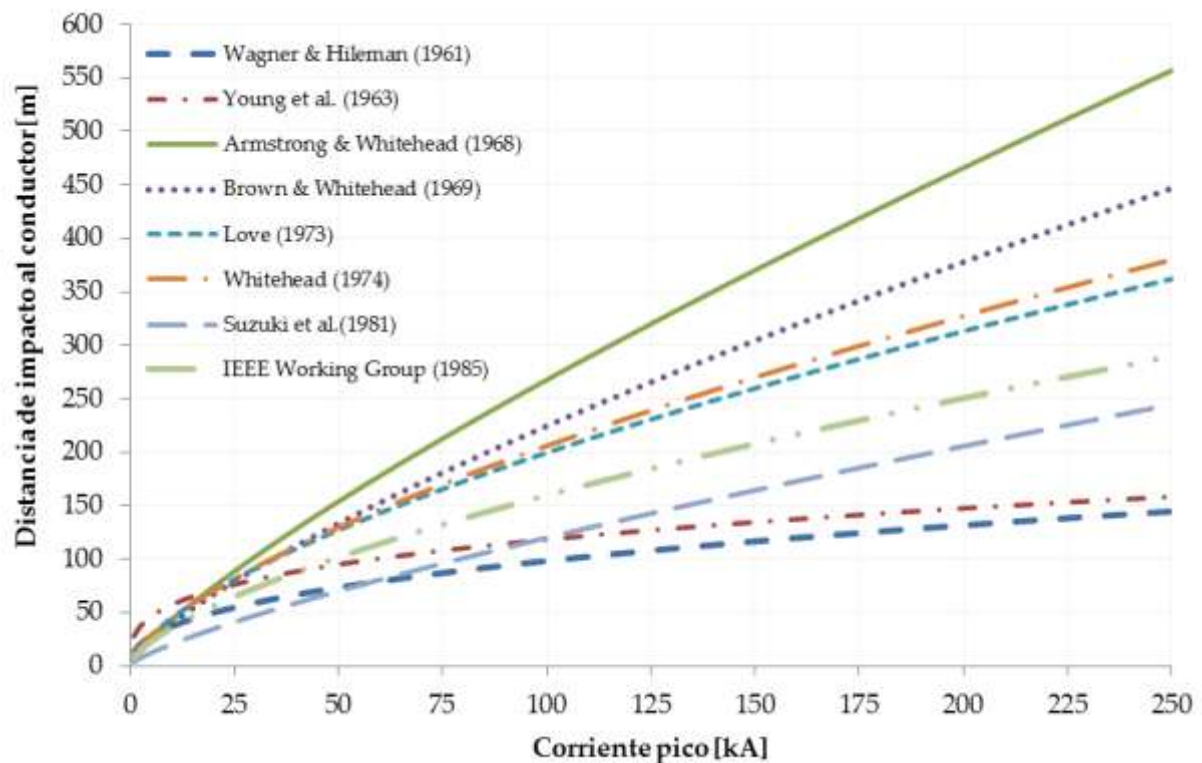


La distancia de impacto a una estructura, tal como un conductor de una LAT, puede expresarse en términos de la distancia crítica a tierra, empleando el factor  $\gamma$ , así:

$$S(I_1) = A \cdot I_1^B = \gamma \cdot S_G(I_1) \quad (2-6)$$

Este factor indica la selectividad que presenta el líder descendente con respecto al conductor y plano de tierra; es decir, considera la probabilidad de que  $S_G$ , que representa el efecto atractivo de la tierra, sea significativamente distinto de  $S$ . Por tanto, estos modelos se denominan EGM tradicionales, ya que tienen por concepto básico la distancia crítica a tierra. Las ecuaciones originalmente planteadas hacen referencia a la corriente esperada a tierra,  $I_G$ , en vez de la corriente esperada al conductor,  $I_1$ .

En la siguiente figura, se muestran las gráficas de las ecuaciones de la distancia de impacto, para los EGM más representativos:

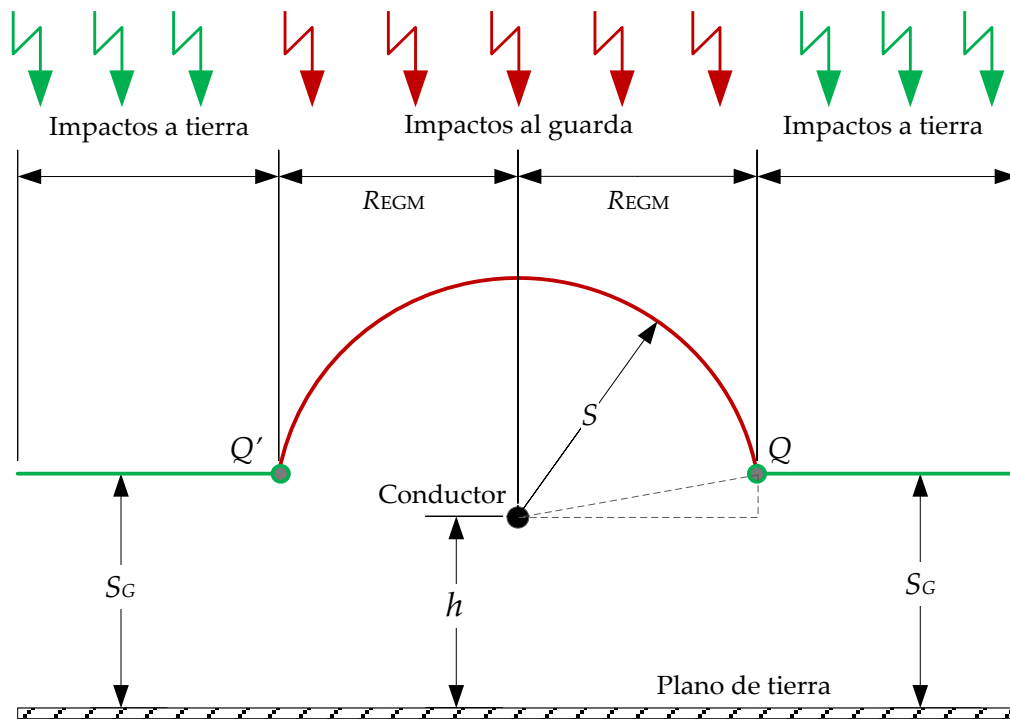


**Figura 2-16** Distancia de impacto vs. Corriente pico de la descarga

### 2.2.3.1.2 Aplicación

#### *Conductor único sin apantallar*

En la [Figura 2-17](#) se considera un conductor, de longitud  $L$  [km], suspendido horizontalmente sobre el suelo a una altura  $h$  [m] y conectado a tierra.



**Figura 2-17** Aplicación de los EGM para un solo conductor

La aplicación de un EGM para determinar el punto de impacto de un rayo, con corriente pico  $I$ , en una situación como la que ilustra la figura, se construye de la siguiente manera:

- ❖ Para una corriente específica,  $I$  [kA], se calculan las distancias de impacto al conductor y al terreno,  $S$  y  $S_G$ , respectivamente.
- ❖ Se traza una línea paralela al nivel del terreno, a una distancia  $S_G$  del suelo.
- ❖ Se delinea una semicircunferencia de radio  $S$ , con centro en el conductor y que intersecte en dos puntos a la línea trazada en el paso anterior.

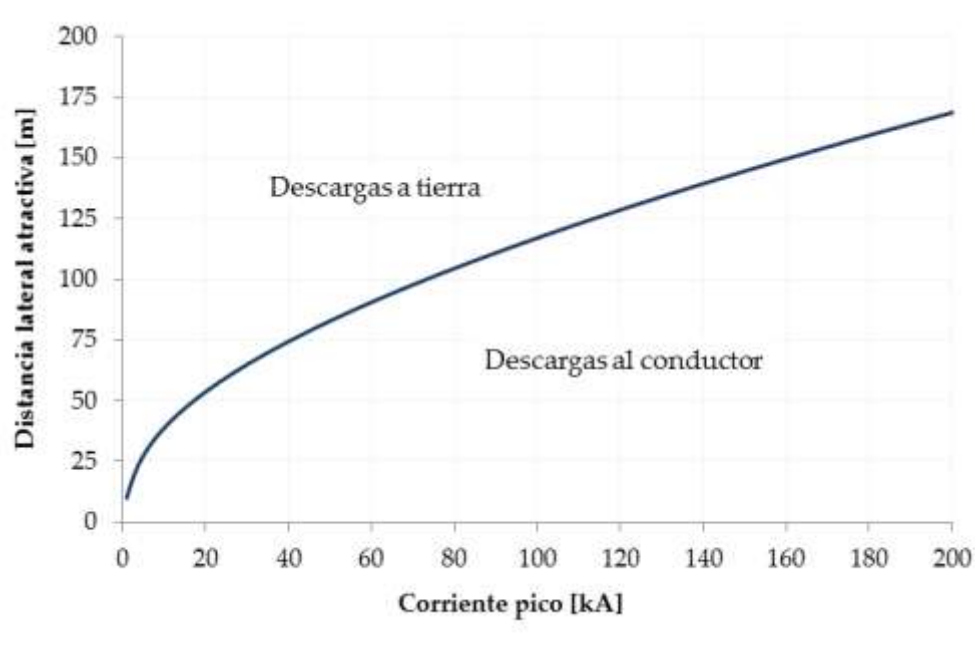
Cualquier descarga con trayectoria vertical que intercepte el arco  $QQ'$  terminará en el conductor. Las descargas que desciendan tanto a la derecha del punto  $Q$  como a la izquierda de  $Q'$ , impactarán en el suelo. En otras palabras, cualquier rayo con trayectoria vertical que descienda a una distancia lateral mayor que  $REGM$ ,

impactará contra el terreno más no contra el conductor. Se define entonces, la Distancia lateral atractiva (*lateral attractive distance*) de un objeto en tierra (conductor o mástil), como la distancia horizontal más grande, medida desde el objeto, a la que se espera que ocurra el proceso de enlace del rayo. Cabe anotar que, si el rayo desciende verticalmente a una distancia mayor que la distancia lateral atractiva del objeto, también ocurrirá el enlace del rayo, pero será con el líder ascendente que se origina en el suelo.

De la figura, se tiene que el valor de la distancia lateral atractiva del conductor,  $R_{\text{EGM}}$  [m], viene dada por la siguiente expresión:

$$R_{\text{EGM}} = \begin{cases} \sqrt{\left(1 - \frac{1}{\gamma^2}\right) S^2 + \left(\frac{2}{\gamma} h\right) S - h^2}, & S_G > h \\ S, & S_G \leq h \end{cases} \quad (2-7)$$

Por debajo del valor de  $R_{\text{EGM}}$ , un rayo impactará directamente al conductor. Esto se ilustra en la [Figura 2-18](#), la cual fue construida con base en el EGM del IEEE Std. 1410 [71] y considerando  $h=18$  m.



**Figura 2-18** Distancia lateral atractiva - conductor no apantallado

El número de impactos a la línea (conductor) para un corriente pico específica,  $N_s|I$ , viene dado por:

$$N_s|I = GFD \cdot 2 \cdot R_{EGM} \cdot L \quad (2-8)$$

En esta fórmula,  $R_{EGM}$  está expresada en kilómetros, la cantidad  $2 \cdot R_{EGM}$  [km] constituye el Ancho de atracción (*attractive width*) del conductor y la cantidad  $2 \cdot R_{EGM} \cdot L$  [km<sup>2</sup>] representa el Área de captación de descargas (*lightning collection area*). Multiplicando esta última por la densidad de rayos al terreno,  $GFD$  [rayos/km<sup>2</sup>/año], se obtiene el número de impactos a la línea,  $N_s$ . Si se considera que la probabilidad de que esta corriente ocurra es  $f_1(I) \cdot dI$ , entonces, el diferencial del número de impactos a la línea,  $dN_s$ , se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$dN_s = GFD \cdot (2 \cdot R_{EGM} \cdot L) \cdot f_1(I) \cdot dI \quad (2-9)$$

El número total esperado de impactos a la línea, viene dado por:

$$N_s = 2 \cdot GFD \cdot L \cdot \int_{I_{min}}^{\infty} R_{EGM} \cdot f_1(I) \cdot dI \quad (2-10)$$

Por medio de la integración se cubren todos los valores posibles de la corriente pico del rayo. El límite inferior de integración,  $I_{min}$ , reconoce que debe existir un valor, distinto de cero, que representa a la descarga con menor corriente registrada; según CIGRÉ,  $I_{min}=3$  kA; sin embargo, otros investigadores creen más razonable bajar hasta valores de 1 o 2 kA.

Existe un límite superior para la corriente pico de la primera descarga de retorno del rayo: 500 kA para los trópicos. Esto, asumiendo 150 kV/m como el campo eléctrico máximo bajo una nube de tormenta. Este tipo de rayos se daría sólo en los océanos [77]. Desde el punto de vista normativo y para aplicaciones en ingeniería, el límite sería 250 kA; sin embargo, de acuerdo con el TC81 de IEC (*Lightning protection*) las corrientes máximas para trópico estarían alrededor de los 300 kA.

La expresión (2-10) se puede describir, teniendo en cuenta la definición de la distancia lateral atractiva,  $R_{EGM}$  [m], en la fórmula (2-7), así:

$$N_s = \frac{2}{1000} \cdot GFD \cdot L \cdot \left[ \int_{I_{min}}^{I_R} S \cdot f_1(I) \cdot dI + \int_{I_R}^{\infty} \sqrt{\left(1 - \frac{1}{\gamma^2}\right) S^2 + \left(\frac{2}{\gamma} h\right) S - h^2} \cdot f_1(I) \cdot dI \right] \quad (2-11)$$

$$I_R = \left( \frac{\gamma \cdot h}{A} \right)^{\frac{1}{B}} \quad (2-12)$$

siendo,  $I_R$  la corriente pico para la cual  $h=S_G$ .

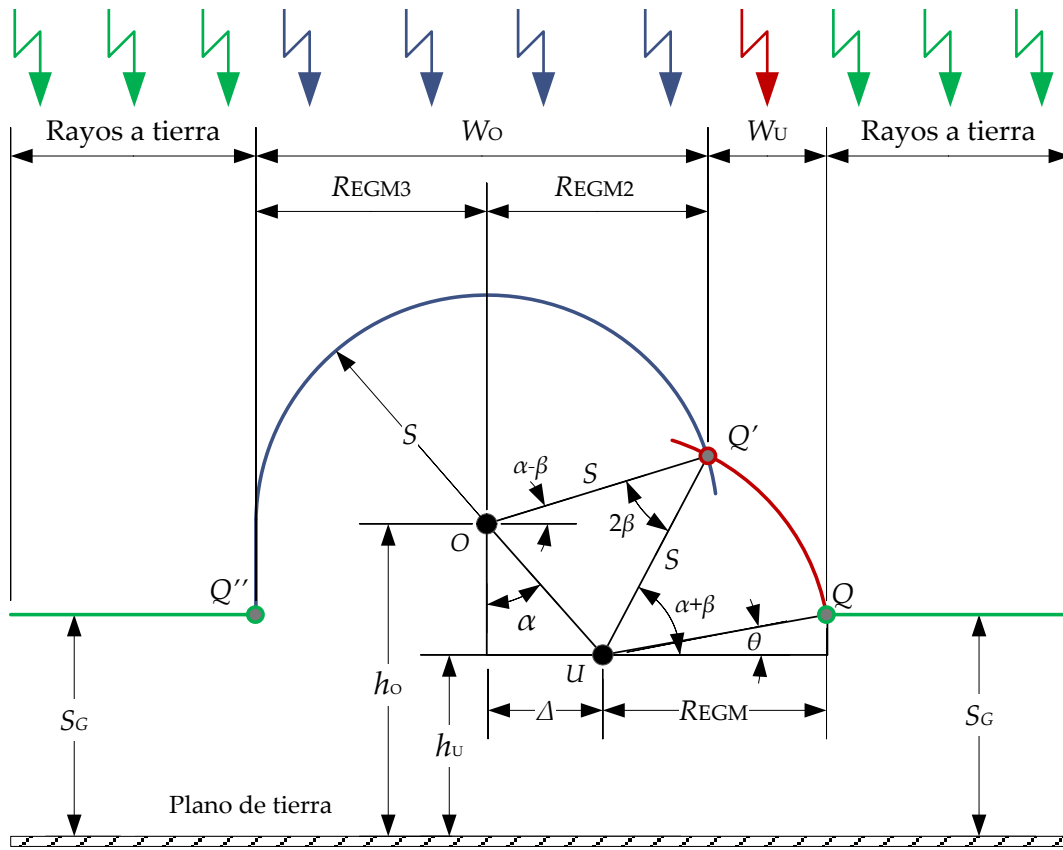
La ecuación (2-11) puede resolverse por integración numérica con la ayuda de algún programa informático especializado en matemáticas.

El análisis anterior se puede extender a una línea que involucre más de un conductor; sin embargo, se debe tener en cuenta el posible solapamiento entre las distancias laterales atractivas de cada conductor, independientemente de la altura a la que estén ubicados. Además, para corrientes pico superiores al valor de la corriente máxima de falla de apantallamiento,  $I_{\max}$ , el conductor más elevado puede proteger a todos o algunos de los conductores restantes, este es el principio geométrico del apantallamiento, como se expone a continuación.

### *Línea monofásica apantallada*

Como se muestra en la [Figura 2-19](#),  $O$  y  $U$  son los puntos de ubicación del cable de guarda y del conductor de fase, respectivamente. En la figura,  $h_o$  y  $h_u$  son las alturas, desde el suelo, del cable de guarda y conductor de fase, respectivamente;  $\Delta$  es la separación horizontal entre ambos y  $\alpha$  es el ángulo de apantallamiento. Cuando el líder descendente se aproxima a la línea, cada conductor (guarda y fase) emite un líder ascendente con un “radio de atracción”,  $S_o$  y  $S_u$ , respectivamente. En general, los EGM consideran que  $S_o$  y  $S_u$  son iguales entre sí y que, además, equivalen a  $S$ .

Si la punta del líder descendente alcanza el arco de blindaje  $Q'Q''$  (*shielding arc*), entonces se producirá el “salto” del rayo hacia el cable de guarda. De otra manera, si un rayo alcanza el arco expuesto  $QQ'$  (*exposed arc*) es porque existe una falla del blindaje (apantallamiento) y entonces el impacto será contra el conductor de fase. Las descargas que no alcancen algún punto de los arcos mencionados, terminarán en tierra.  $S$  corresponde a la distancia crítica del conductor (fase y guarda) y  $S_G$  es la distancia de impacto a tierra. De acuerdo con la ecuación (2-6), a diferentes corrientes pico de la descarga, corresponderán diferentes distancias críticas,  $S$  y  $S_G$ . Nótese que, debido a que el cable de guarda se sitúa por encima del conductor de fase, se presenta solapamiento entre las distancias laterales atractivas,  $R_{EGMG}$  y  $R_{EGM2}$ .



**Figura 2-19** Definición de ángulos y distancias

Considerando solamente descargas con trayectoria vertical, si un rayo incide sobre la línea, entonces las probabilidades de impacto contra el cable de guarda y conductor de fase,  $P_O$  y  $P_U$ , respectivamente, vienen dadas por:

$$P_O = \frac{W_O}{W_O + W_U} \quad (2-13)$$

$$P_U = \frac{W_U}{W_U + W_O}$$

siendo,  $W_O$  [m] y  $W_U$  [m] los anchos expuestos del cable de guarda y conductor de fase, respectivamente. De la geometría de la **Figura 2-19**, se deducen las siguientes expresiones:

$$W_O = R_{EGM2} + R_{EGM3} \quad (2-14)$$

$$W_U = R_{EGM} - R_{EGM2} + \Delta$$

$$R_{\text{EGM}} = \begin{cases} S \cos \theta, & S_G > h_U \\ S, & S_G \leq h_U \end{cases}$$

$$R_{\text{EGM2}} = \Delta + S \cos(\alpha + \beta) = S \cos(\alpha - \beta) \quad (2-15)$$

$$R_{\text{EGM3}} = \begin{cases} \sqrt{S^2 - (S_G - h_O)^2}, & S_G > h_O \\ S, & S_G \leq h_O \end{cases}$$

$$\theta = \sin^{-1} \left( \frac{S_G - h_U}{S} \right)$$

$$\alpha = \sin^{-1} \left( \frac{\Delta}{\sqrt{\Delta^2 + (h_O - h_U)^2}} \right) \quad (2-16)$$

$$\beta = \sin^{-1} \left( \frac{\sqrt{\Delta^2 + (h_O - h_U)^2}}{2 \cdot S} \right)$$

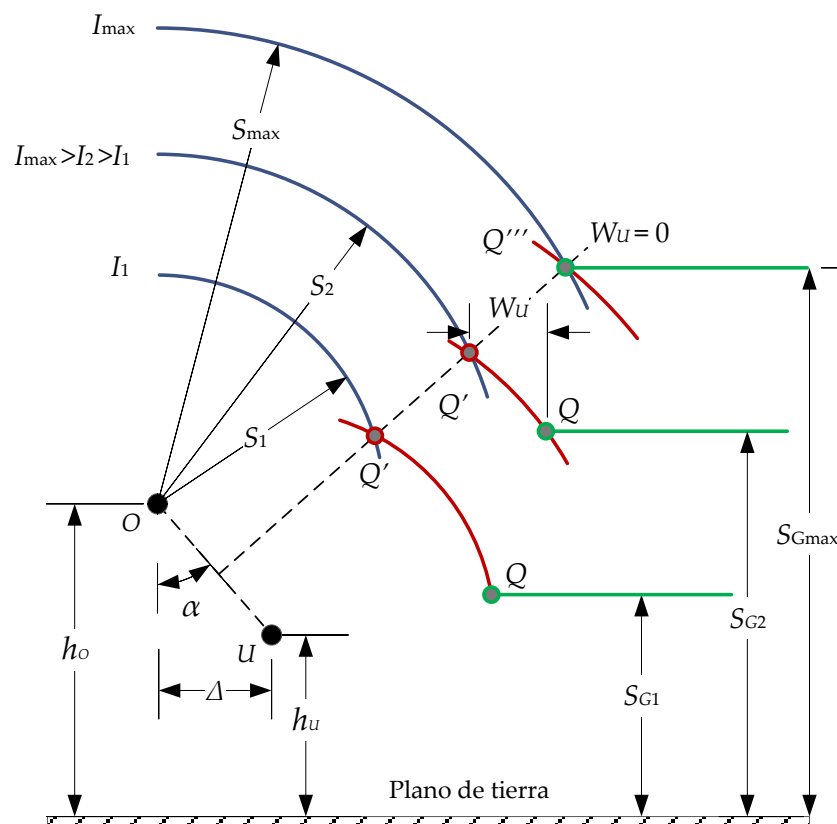
Si se considera que  $\Delta$  es muy pequeña comparada con  $R_{\text{EGM}}$  y  $R_{\text{EGM2}}$ , entonces es válido lo siguiente:

- ❖ Si  $R_{\text{EGM}}$  es mayor que  $R_{\text{EGM2}}$ , entonces la fase estará expuesta y existirá una Zona de falla (con un ancho  $W_U$ ), una Zona protegida (con un ancho  $W_O$ ) y una Zona de tierra (a la izquierda de  $Q''$  y a la derecha de  $Q$ ); es decir, dependiendo de la magnitud (corriente pico) y posición de una descarga, esta impactará en la fase, en el guarda o en el suelo;
- ❖ Si, por el contrario,  $R_{\text{EGM}}$  es menor o igual que  $R_{\text{EGM2}}$ , entonces la fase estará blindada y sólo existirán la zona protegida y la zona de tierra; o sea que la descarga impactará contra el guarda o en el terreno.

### Corriente máxima de falla de apantallamiento

Como se mencionó al principio del numeral **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, la corriente máxima de falla de apantallamiento,  $I_{\max}$ , es aquel valor de corriente pico por encima del cual no habrá impactos contra el conductor de fase.

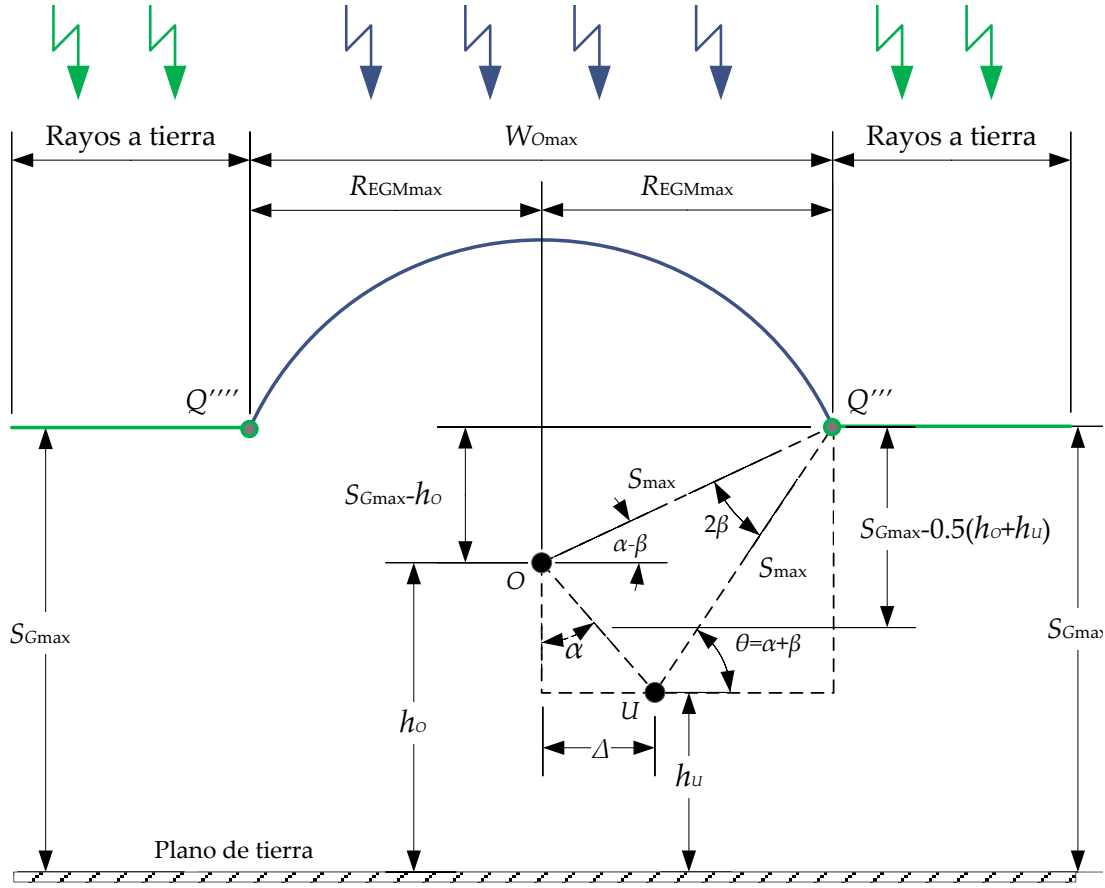
Este concepto puede explicarse gráficamente por medio de la **Figura 2-20**, donde el esquema de la **Figura 2-19** se repite para corrientes cuyo valor se va incrementando. Se puede observar que con el aumento de  $I$ , el valor de  $W_u$  disminuye hasta que se hace cero. Es decir, cuanto mayor sea la corriente pico considerada, mayores serán también las distancias de impacto,  $S$  y  $S_G$ , con lo cual, el arco expuesto  $QQ'$  disminuirá hasta hacerse nulo.



**Figura 2-20** Definición de la corriente máxima de falla de apantallamiento

En términos geométricos,  $I_{\max}$  corresponde al valor de corriente pico que hace que todas las distancias de impacto coincidan en un punto. La **Figura 2-21** ilustra esta situación, ya que los puntos  $Q$  y  $Q'$  coinciden en uno solo, llamado  $Q'''$ , en el cual  $I_{\max}$  está definida.





**Figura 2-21** Buscando la corriente máxima de falla del apantallamiento

Considerando magnitudes de  $I$  superiores a  $I_{\max}$ , se tiene que el ancho expuesto  $W_F$  es nulo, resultando que el ancho de blindaje correspondiente a esta situación,  $W_{G\max}$ , es:

$$R_{EGM\max} = \begin{cases} \sqrt{S_{\max}^2 - (S_{G\max} - h_o)^2}, & S_{G\max} > h_o \\ S_{\max}, & S_{G\max} \leq h_o \end{cases} \quad (2-17)$$

$$W_{O\max} = 2 \cdot R_{EGM\max}$$

Nótese que,  $W_{O\max}$  equivale al doble de la distancia lateral atractiva del cable de guarda (en este caso para descargas con corriente pico superior a  $I_{\max}$ ).

La distancia de impacto a tierra, asociada a la corriente máxima de falla de apantallamiento (distancia máxima de choque),  $S_{Gmax}$ , viene dada por la siguiente expresión [78]:

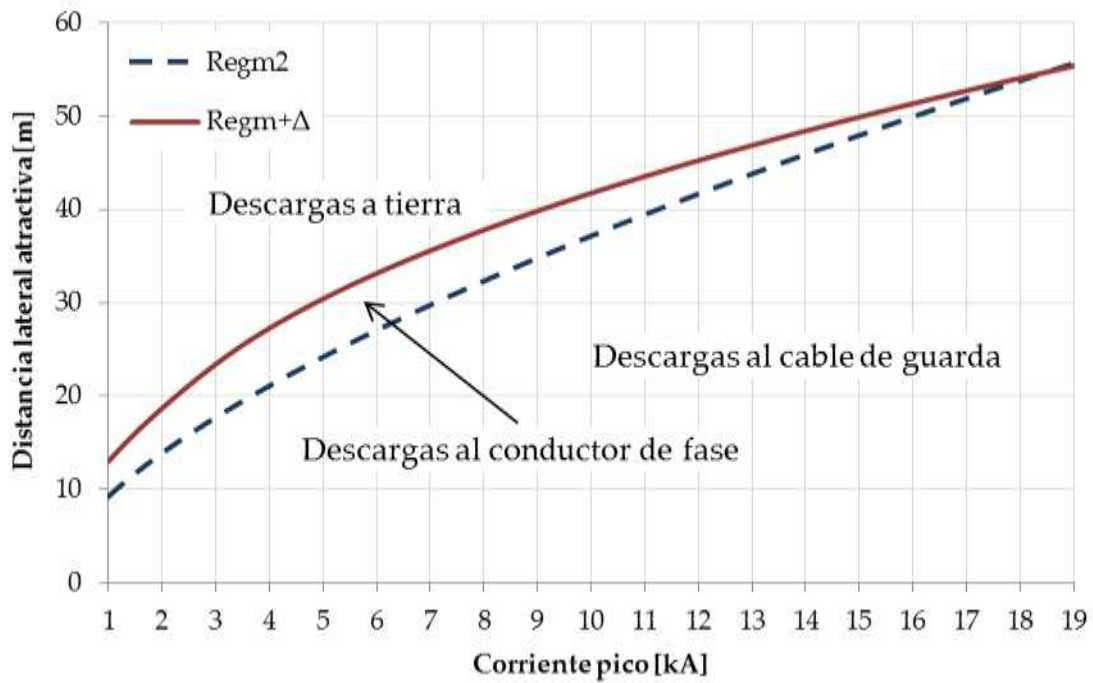
$$S_{Gmax} = \frac{h_o + h_u}{2k_0} \left\{ 1 + \sqrt{1 - k_0 \left[ 1 + \left( \frac{\Delta}{h_o + h_u} \right)^2 \right]} \right\} \quad (2-18)$$

$$k_0 = 1 - (\gamma \sin \alpha)^2$$

Por todo lo expuesto hasta ahora, se tiene que la expresión para el cálculo de la corriente máxima de falla de apantallamiento,  $I_{max}$ , es la siguiente:

$$I_{max} = \left( \frac{\gamma \cdot S_{Gmax}}{A} \right)^{\frac{1}{B}} \quad (2-19)$$

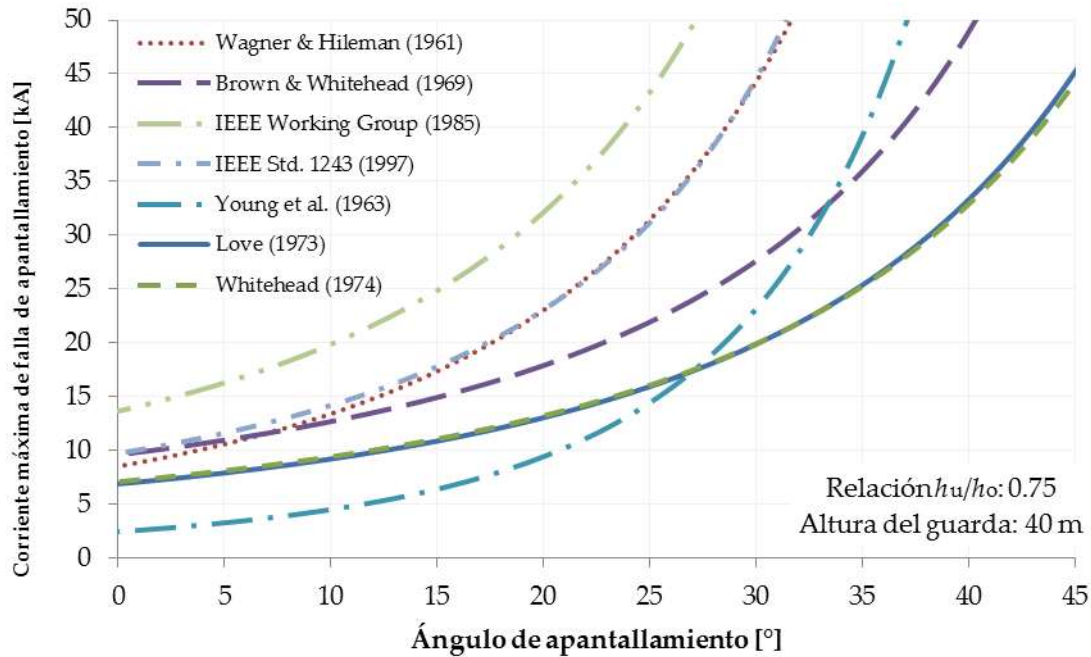
En la [Figura 2-22](#) se puede apreciar el efecto del cable de guarda en la línea monofásica de la [Figura 2-18](#): Las distancias laterales atractivas para el cable de guarda y el conductor de fase varían con la corriente pico de la descarga.



**Figura 2-22** Distancia lateral atractiva (Línea monofásica apantallada)

Los datos para la gráfica son: EGM del IEEE Std. 1410 [71];  $h_o=22$  m;  $h_u=18$  m;  $\Delta=3$  m. En la figura se observa que las curvas se intersectan en  $I=18.5$  kA, aproximadamente. Esto quiere decir que el conductor está completamente apantallado por el cable de guarda para corrientes de descarga superiores a dicho valor. Empleando las expresiones (2-18) y (2-19) se calcula que  $I_{\max}=18.48$  kA. El espacio entre las dos curvas representa la zona donde se producen las descargas al conductor de fase.

Al observar las ecuaciones (2-18) y (2-19) puede deducirse que, para valores fijos de los parámetros  $A$  y  $B$ , el valor de  $I_{\max}$  se incrementa al aumentar la altura de la línea de transmisión y el ángulo de apantallamiento (ver la Figura 2-23).



**Figura 2-23** Corriente máxima de falla de apantallamiento -EGM

El número total de impactos esperados contra el cable de guarda, se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$N_o = \frac{GFD \cdot L}{1000} \cdot \left[ \int_{I_{\min}}^{I_{\max}} W_o \cdot f_1(I) \cdot dI + \int_{I_{\max}}^{\infty} W_{Omax} \cdot f_1(I) \cdot dI \right] \quad (2-20)$$

donde, las variables  $W_o$  y  $W_{Omax}$ , ambas expresadas en metros, vienen dadas por las fórmulas (2-14) y (2-17), respectivamente.

### Ángulo de apantallamiento perfecto

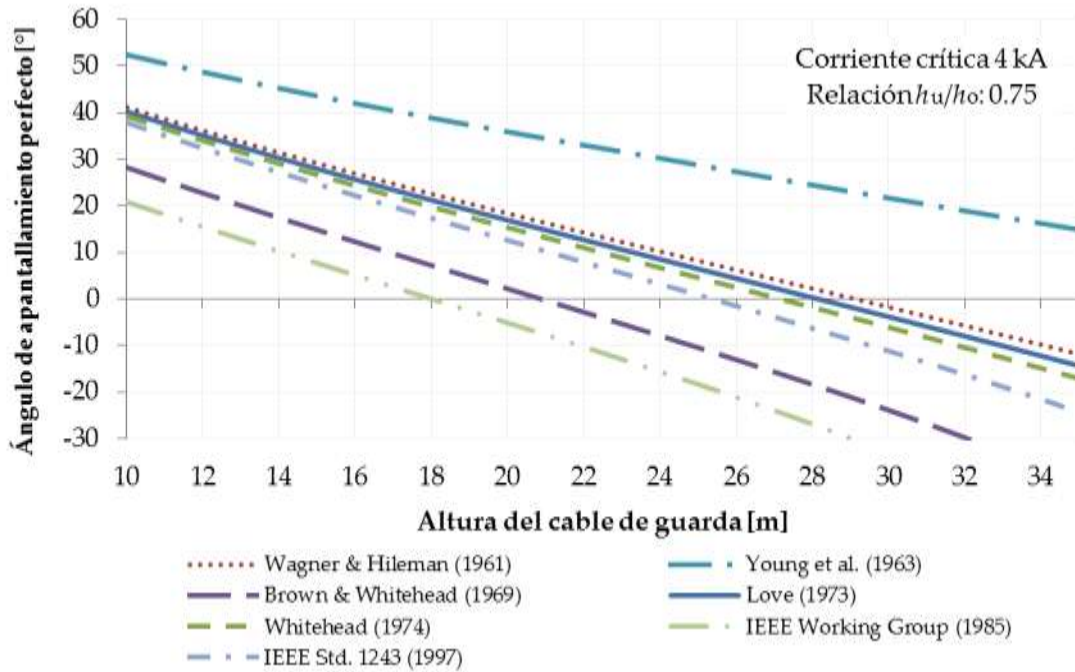
De acuerdo con lo expuesto en hasta ahora, el Ángulo de apantallamiento perfecto (*perfect shielding angle*) se puede lograr cuando la corriente crítica y la corriente máxima de falla de apantallamiento son iguales. Esto equivale a decir que este ángulo, absolutamente, evitará la salida de la línea por fallas de apantallamiento.

De la [Figura 2-21](#) se obtiene una expresión que permite calcular el valor del ángulo de apantallamiento perfecto,  $\alpha_{\text{perf}}$ :

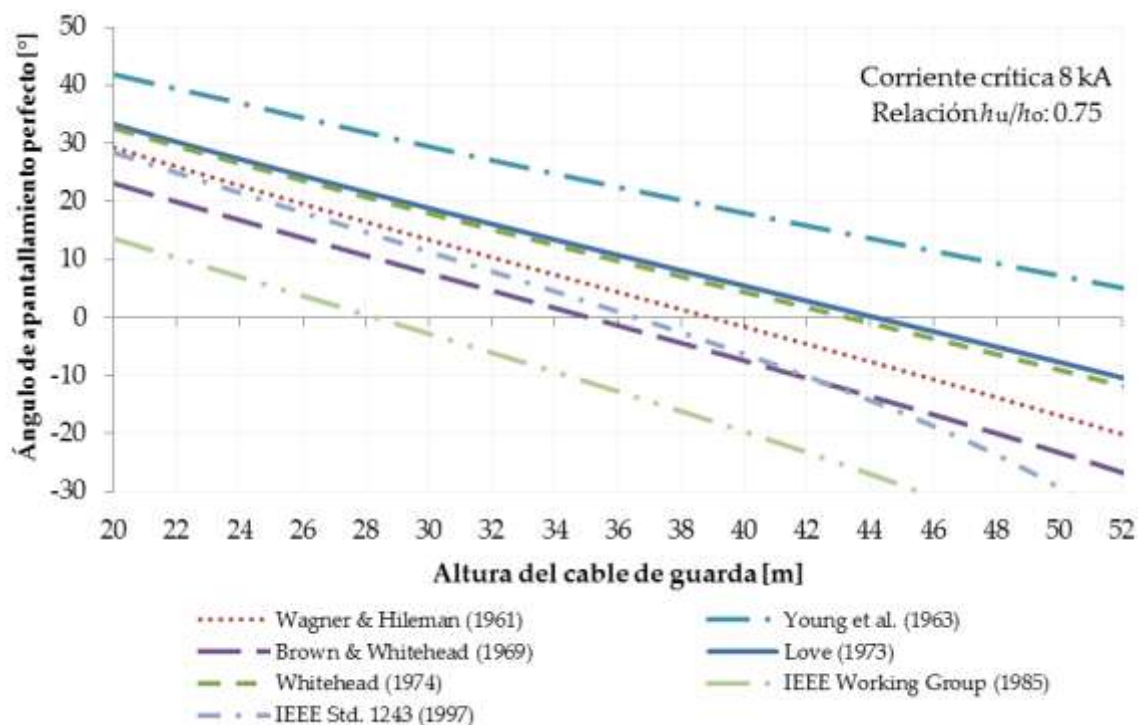
$$\alpha_{\text{perf}} = \frac{1}{2} \left[ \sin^{-1} \left( \frac{1}{\gamma} - \frac{h_o}{A \cdot I_{\text{crit}}^B} \right) + \sin^{-1} \left( \frac{1}{\gamma} - \frac{h_o}{A \cdot I_{\text{crit}}^B} \right) \right] \quad (2-21)$$

siendo,  $I_{\text{crit}}$  [kA] la corriente crítica (o corriente mínima que se requiere para causar flameo). Su valor puede calcularse a partir de la Impedancia del conductor de fase,  $Z_U$  [ $\Omega$ ], y de la Tensión crítica de flameo,  $U_{\text{crit}}$  [kV]:

$$I_{\text{crit}} = \frac{2 \cdot U_{\text{crit}}}{Z_U} \quad (2-22)$$



**Figura 2-24** Ángulo de apantallamiento perfecto ( $I_{\text{crit}} = 4 \text{ kA}$ ) – EGM



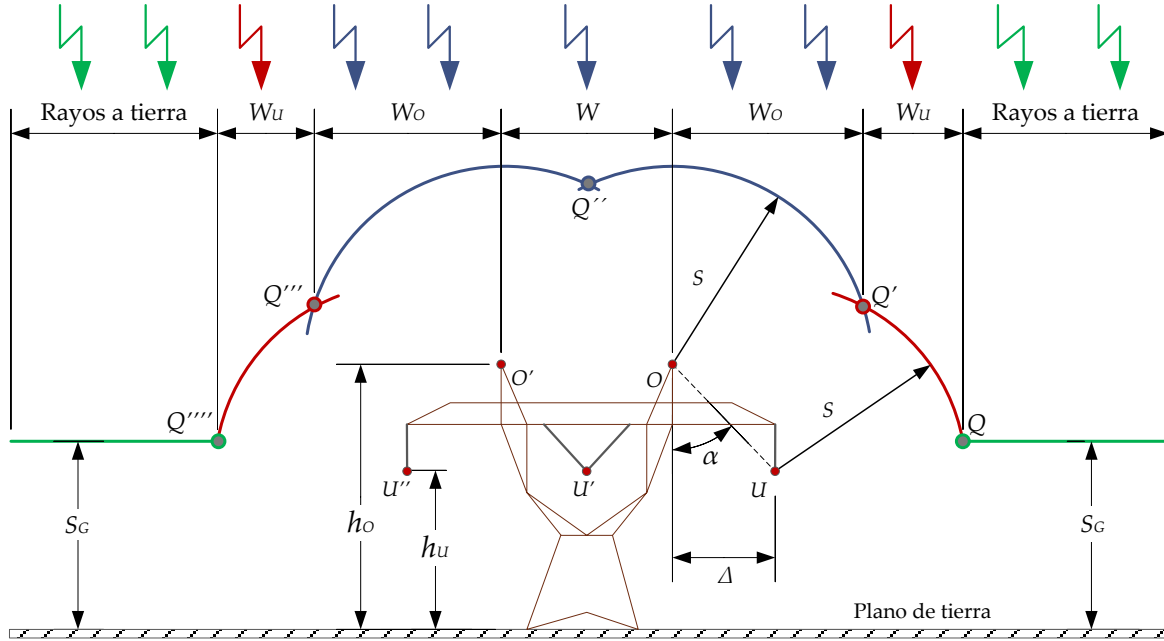
**Figura 2-25** Ángulo de apantallamiento perfecto ( $I_{crit} = 8 \text{ kA}$ ) - EGM

### *Línea trifásica apantallada*

En el análisis del apantallamiento se considera el esquema general que se muestra en la [Figura 2-26](#), correspondiente a una LAT trifásica, protegida por dos cables de guarda; esquema que ha sido adoptado por el Cigré WG33-01 [13] y por el estándar IEEE Std. 1243 [12], para el análisis del desempeño de líneas de transmisión frente al rayo.

En la figura, se han trazado arcos con centro en los conductores de fase (puntos  $U$ ,  $U'$  y  $U''$ ) y en los cables de guarda (puntos  $O$  y  $O'$ ), considerando un radio  $S$ , en ambos casos. La línea horizontal trazada a una altura  $S_G$  desde el suelo, determina la zona de tierra. Los puntos  $Q$  y  $Q''''$  marcan las intersecciones entre la línea horizontal paralela al suelo y los arcos cuyos centros son los conductores de fase; los puntos  $Q$  y  $Q''$  marcan las intersecciones entre los arcos cuyos centros son los conductores de fase y aquellos cuyos centros son los cables de guarda; por último, la intersección entre los arcos cuyos centros son los cables de guarda está marcada como  $Q''$ . Las descargas que alcancen el arco  $QQ'$  impactarán contra el conductor situado en el punto  $U$ . El cable de guarda ubicado en el punto  $O$  será impactado por aquel rayo que alcance el arco  $QQ''$ . Análisis similar relaciona a los arcos

$Q'''Q''''$  y  $Q''Q'''$  con los cables localizados en  $U''$  y  $O'$ , respectivamente.  $W$  representa la separación horizontal entre los cables de guarda. Al suponer que el rayo desciende verticalmente, se tiene que  $W_o$  corresponde al ancho expuesto de cada cable de guarda ( $O$  y  $O'$ ) y  $W_u$  corresponde al ancho expuesto de cada conductor de fase ubicado en un extremo de la estructura ( $U$  y  $U''$ ).



**Figura 2-26** Modelo de una Línea de transmisión trifásica apantallada

Luego, si un rayo incide sobre la línea, la probabilidad de impactar en un conductor de fase es:

$$P_u = \frac{2 \cdot W_u + W}{2 \cdot W_u + 2 \cdot W_o + W} = \frac{W_u + \frac{W}{2}}{W_u + W_o + \frac{W}{2}} \quad (2-23)$$

y la probabilidad de que impacte contra el cable de guarda es:

$$P_o = \frac{2 \cdot W_o + W}{2 \cdot W_o + 2 \cdot W_u + W} = \frac{W_o + \frac{W}{2}}{W_o + W_u + \frac{W}{2}} \quad (2-24)$$

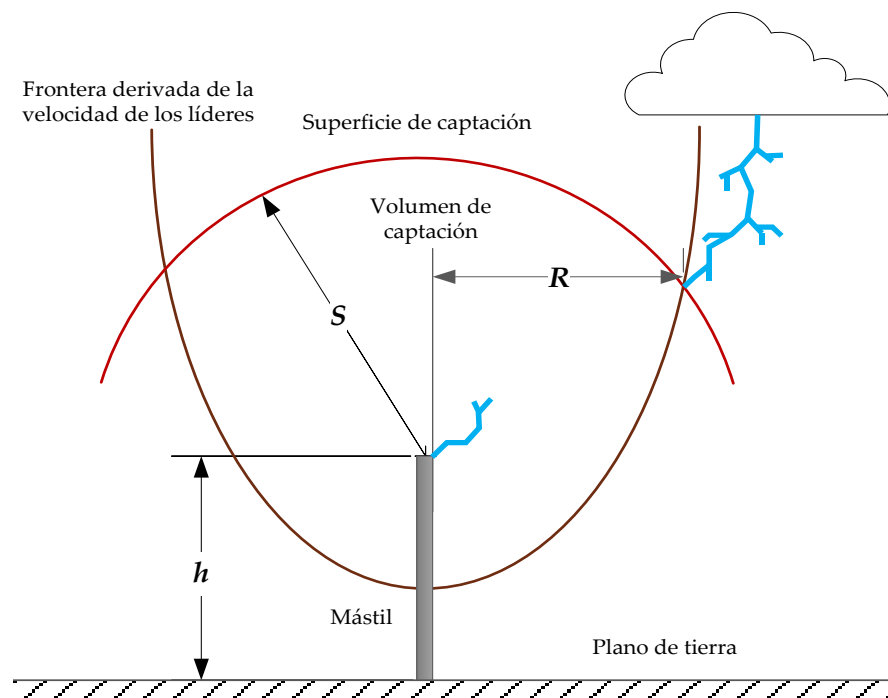
### La fase central

Con referencia en la [Figura 2-26](#), el análisis de falla de apantallamiento ha estado enfocado en las fases ubicadas en los puntos  $M$  y  $M'$ , por considerarlas como las más expuestas. Esto no significa que la fase central, ubicada en el punto  $O$ , no pueda ser impactada por un rayo cuando exista una falla del blindaje que proporcionan los cables de guarda ubicados en los puntos  $T$  y  $T'$ . En la práctica, en este tipo de configuración los impactos contra el conductor central son nulos. Si se establece una separación entre cables de guarda,  $W$ , tal que se cumpla la premisa del “apantallamiento efectivo”, entonces, como lo demostraron Holt y Nguyen [79], la tasa de impactos al conductor central se puede calcular y es en esencia cero para los diseños convencionales de este tipo de torres.

#### 2.2.3.2 El Modelo de Eriksson

##### 2.2.3.2.1 Principios

En 1979, basándose en el análisis de fotografías de impactos de rayos a estructuras de más de 70 m de altura (en Suráfrica), A.J. Eriksson sugirió que la conexión exitosa entre los líderes descendente y ascendente sólo puede ocurrir dentro de una zona geométrica definida, llamada el Volumen de captación (*collective volume*).



**Figura 2-27** El método del Volumen de captación de Eriksson

La extensión lateral de ese volumen,  $R$ , está definida por la razón de las velocidades de propagación de los líderes del rayo (descendente y ascendente) y por la distancia a la cual se inicia el líder conector (distancia de impacto).

Como se ilustra en la [Figura 2-27 \[80\]](#), el inicio del líder ascendente se da cuando la punta del líder descendente toca cualquier punto del arco de radio  $S$ . En este modelo, se supone que el líder descendente sigue una trayectoria vertical sin desviaciones, mientras que el líder ascendente se dirige hacia el primero. Si ambos se encuentran, se considera que el rayo impacta contra el mástil; si no, entonces el trazador baja hasta impactar contra el terreno. Tanto la superficie de captación como el lugar geométrico<sup>44</sup> que determina el Radio de atracción (*attractive radius*)  $R$ , se pueden calcular para muchos valores de corriente de retorno. El valor de  $R$  [m] se mide a partir del punto de encuentro de los líderes y depende, además, de la corriente pico de la descarga  $I_l$  [kA], de la altura de la estructura,  $h$  [m]:

$$R = \begin{cases} 0.84 \cdot I^{0.74} \cdot h^{0.6}, & \text{Mástil} \\ 0.67 \cdot I^{0.74} \cdot h^{0.6}, & \text{Conductor} \end{cases} \quad (2-25)$$

Las anteriores, corresponden a expresiones analíticas obtenidas por regresión de los resultados obtenidos por Eriksson a partir de su LPM simplificado. Nótese que, para conductores horizontales adoptó una reducción del 80% con respecto a la constante que corresponde a los mástiles.

A.J. Eriksson hizo una distinción interesante entre  $S$  y  $R$ : La primera es la distancia crítica requerida para que se inicie el líder ascendente, mientras que la segunda corresponde a la distancia crítica para que se dé la conexión de los dos líderes. Ahora, de acuerdo a lo expuesto a lo largo de este capítulo, la condición para el salto final se alcanza cuando la zona de streamers de un líder se encuentra con la zona del streamers del otro. Una vez, esto sucede, la descarga eléctrica es inevitable. No obstante, en el análisis de Eriksson no se tiene en cuenta esta condición para el salto final ya que se asume que para que se produzca el enlace las dos puntas de los canales líderes tienen que encontrarse.

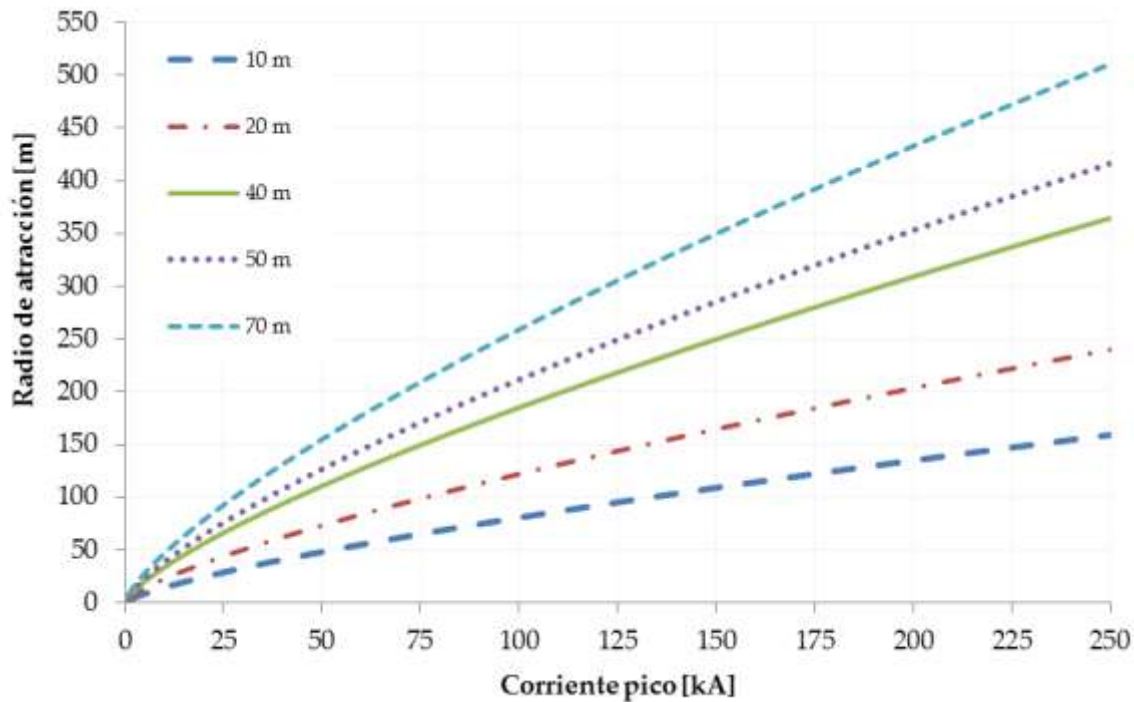
La modificación o “mejora” que hizo Eriksson a los EGM tradicionales consiste en que introdujo el concepto de radio de atracción en el análisis del apantallamiento

---

<sup>44</sup> En la figura, es la frontera derivada de las velocidades de propagación de ambos líderes del rayo. En inglés, esta curva limítrofe se denomina *Interception Locus*.



de las líneas de transmisión [45]; empleando este radio para dibujar arcos cuyos centros son el cable de guarda y el conductor de fase.



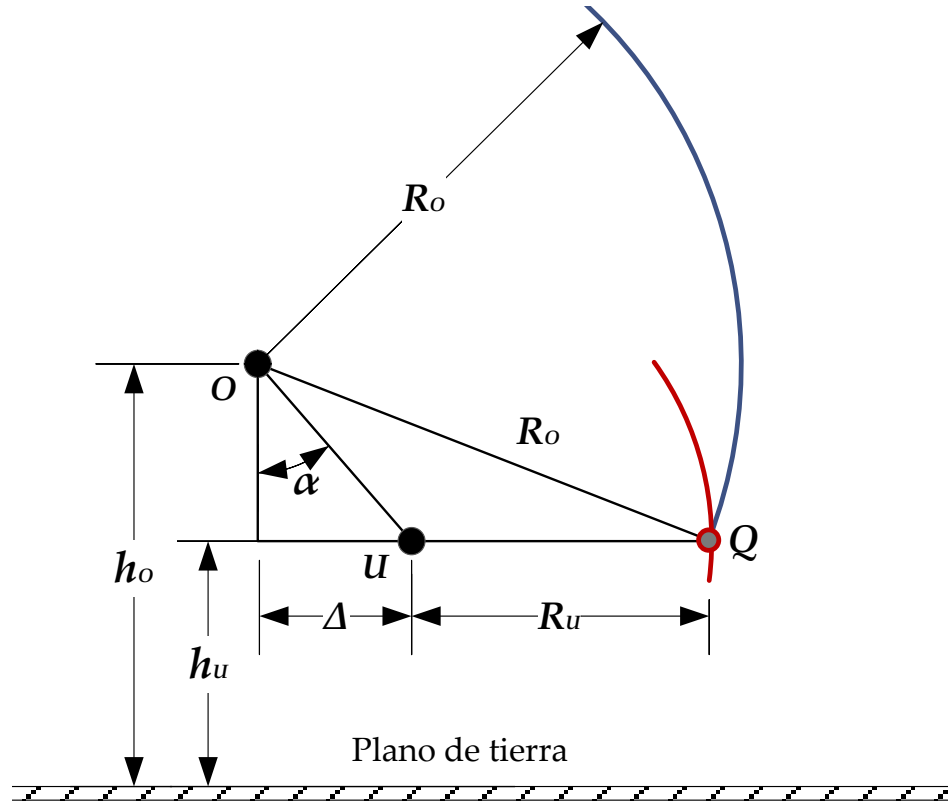
**Figura 2-28** Radio de atracción vs Corriente pico – IEGM de Eriksson

### 2.2.3.2.2 Aplicación

De acuerdo con la [Figura 2-29](#), cualquier rayo que alcance el arco  $QQ'$  terminará en el conductor de fase; si el rayo alcanza el arco  $Q'Q''$ , entonces terminará en el cable de guarda. Esto es, cualquier líder descendente que no alcance los arcos mencionados impactará contra el suelo. Esto quiere decir que el impacto a tierra es una condición “por defecto”. De la figura, también es posible resaltar que existen dos distancias de impacto diferentes, una al cable de guarda y otra al conductor de fase,  $R_o$  y  $R_u$ , respectivamente. Esto porque están en función de la altura de ubicación de cada conductor. Además, no existe distancia de impacto a tierra. Los arcos circulares terminan en una línea horizontal paralela al plano de tierra, ubicada a una altura  $h_o$  si se trata del cable de guarda o  $h_u$  si se refiere al conductor de fase. No se permite que el líder descendente “viaje” debajo de  $Q$  o de  $Q''$ , según el caso, y luego suba hasta encontrar el líder conector que emerge de  $U$  o de  $O$ , respectivamente.


$$QQ' = \frac{R_M}{57.3} \cdot \left\{ \alpha + 90^\circ - \cos^{-1} \left[ \frac{R_U^2 - R_O^2 + t^2}{2 \cdot R_U \cdot t} \right] \right\}; \quad t = \frac{h_O - h_U}{\cos \alpha} \quad (2-26)$$

51



**Figura 2-30** Buscando la Corriente máxima de falla de apantallamiento - IEGM

El valor de  $I_{\max}$  [kA] se puede calcular por medio de la siguiente fórmula:

$$I_{\max} = \left[ t \left( \frac{\sin \alpha + \sqrt{\sin^2 \alpha + (\Gamma^2 - 1)}}{0.67 \cdot h_u^{0.6} \cdot (\Gamma^2 - 1)} \right)^{0.74} \right]^{\frac{1}{0.74}} ; \Gamma = \left( \frac{h_o}{h_u} \right)^{0.6} \quad (2-27)$$

Al observar esta ecuación, puede deducirse que el valor de  $I_{\max}$  se incrementa al aumentar la altura de la línea de transmisión y el ángulo de apantallamiento; efectos que concuerdan con aquellos deducidos para los EGM tradicionales.

El ángulo de apantallamiento perfecto viene dado por:

$$\alpha_{\text{perf}} = \tan^{-1} \left[ \frac{\sqrt{(0.67 \cdot I_{\text{crit}}^{0.74} \cdot h_o^{0.6})^2 - (h_o - h_u)^2} - 0.67 \cdot I_{\text{crit}}^{0.74} \cdot h_u^{0.6}}{h_o - h_u} \right] \quad (2-28)$$

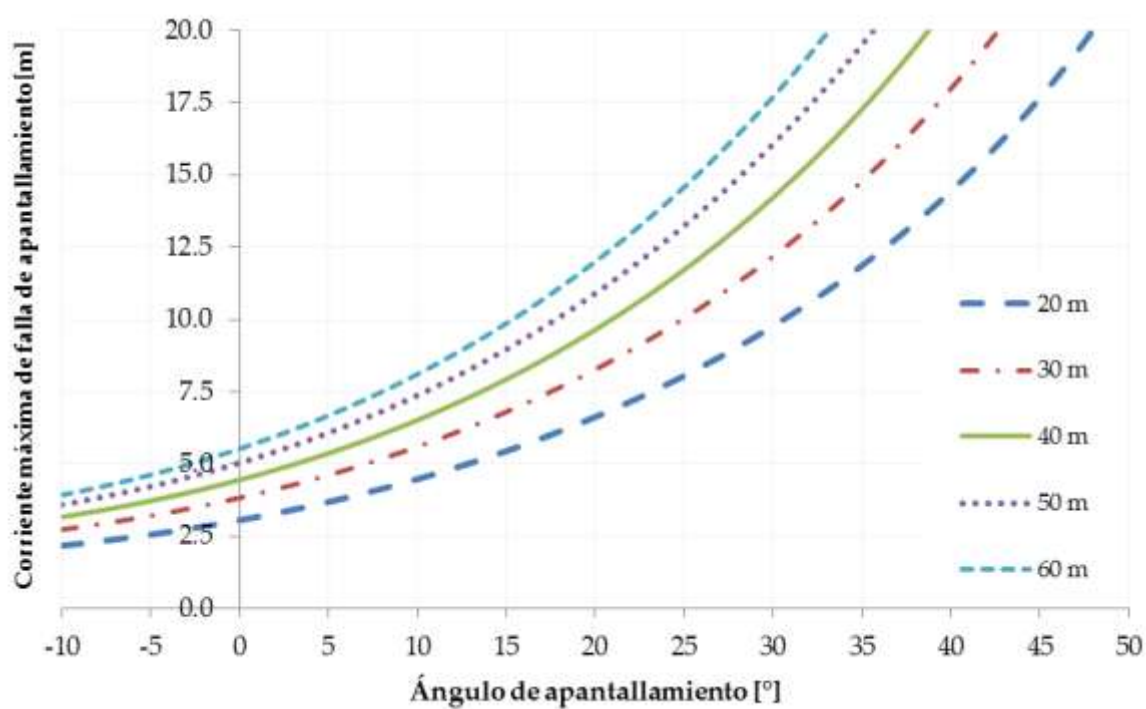


Figura 2-31 Corriente máxima de falla de apantallamiento – IEGM de Eriksson

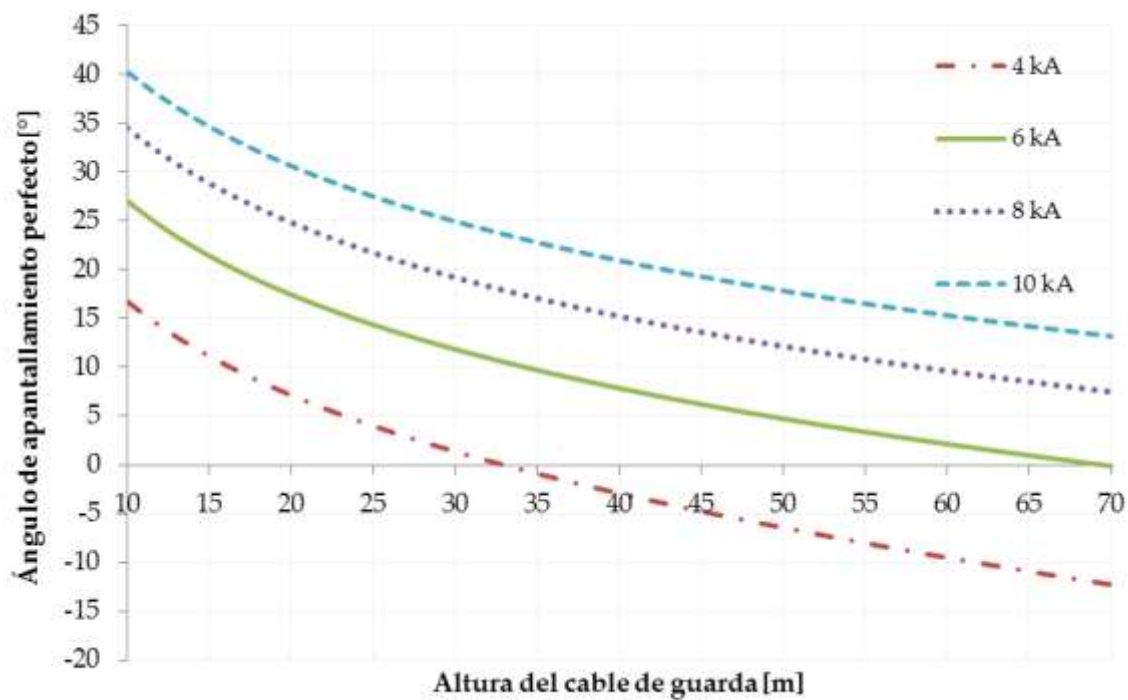
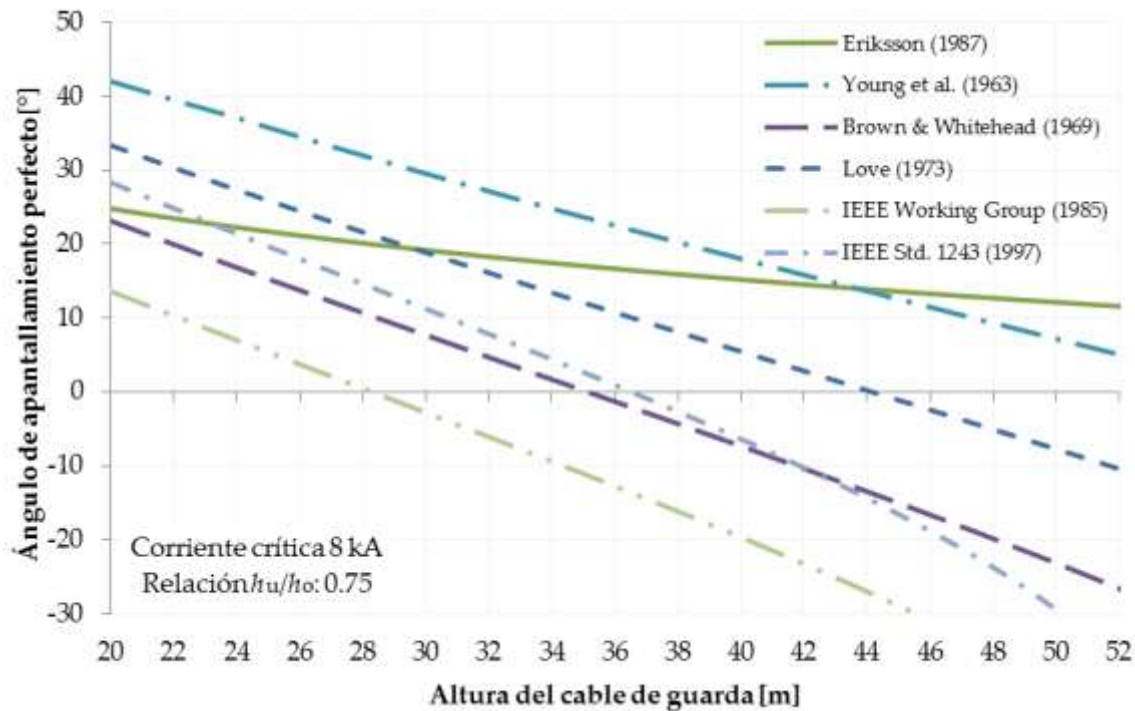


Figura 2-32 Ángulo de apantallamiento perfecto – IEGM de Eriksson

En la [Figura 2-33](#) se muestran los ángulos de apantallamiento perfecto, calculados a partir de los EGM más relevantes, incluido el IEGM.



**Figura 2-33** Ángulos de apantallamiento perfecto – comparación EGM e IEGM

Los datos para la gráfica son:  $I_{crit}=10$  kA,  $h_o-h_u=4$  m. Nótese que, respecto de los EGM tradicionales, con excepción de la versión de Young [37], los ángulos resultantes son negativos para alturas de conductor superiores a los 30 m. Según Hileman [78], esto se debe a que Young y sus asociados consideraron descargas verticales solamente. Nótese que, en el IEGM, el ángulo de apantallamiento perfecto presenta poca sensibilidad al cambio en la altura del conductor de fase, cuando según lo argumentado por Eriksson, en su momento, es que la altura del conductor es de suprema importancia en su modelo. Esta peculiaridad fue expuesta por primera vez por Hileman en la discusión del artículo de Eriksson [46].

**Nota:** En la práctica, se emplean ángulos de apantallamiento negativos que no sobrepasan los  $-10^\circ$ .

### 2.2.3.3 Modelos Genéricos (GM)

Siguiendo el trabajo de Eriksson, varios investigadores desarrollaron modelos de enlace del rayo que también consideran el inicio del líder conector emergente del objeto a ser impactado. Hoy en día, tales modelos, llamados genéricos, constituyen una alternativa para realizar el análisis de apantallamiento de una línea de transmisión.

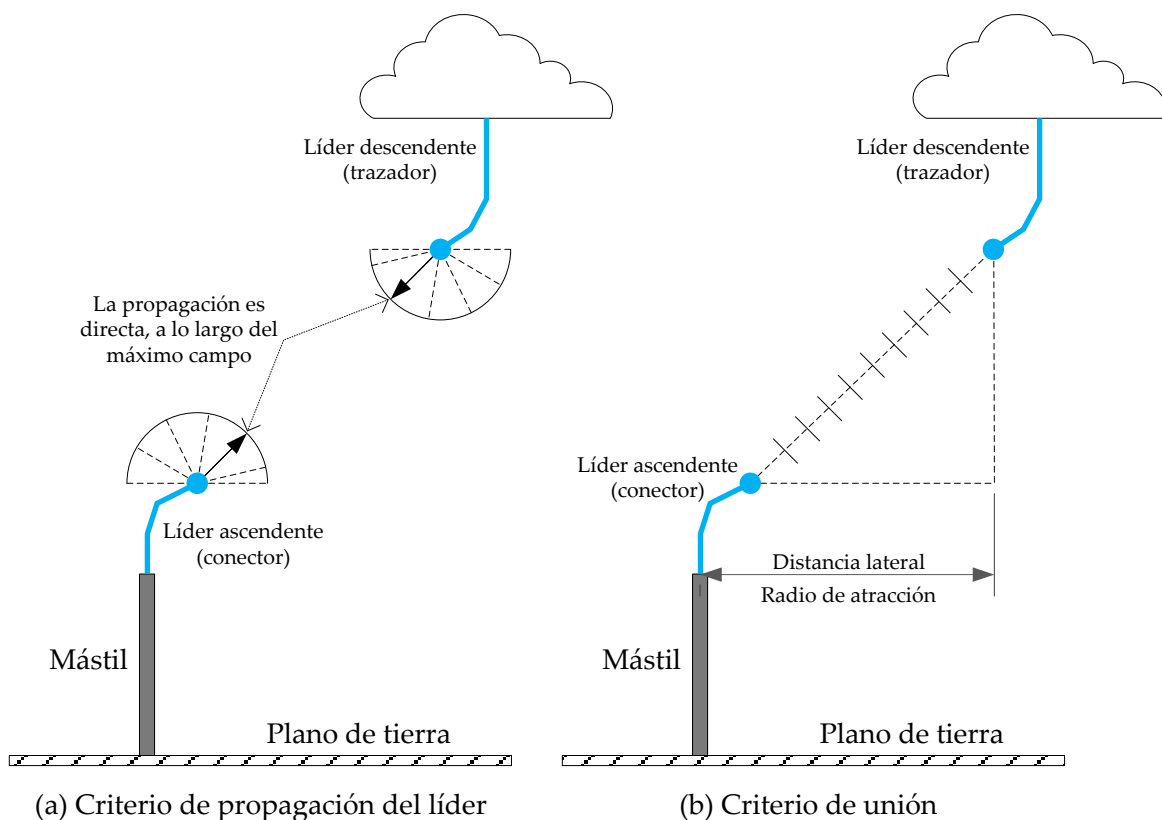
#### 2.2.3.3.1 Principios

En general, los EGM se basan en la simulación del instante en el que se forma el líder ascendente positivo a partir de una estructura, mientras el líder negativo va descendiendo a tierra. En su trayectoria, este trazador va dejando un canal conductivo que forma una distribución de cargas eléctricas y, a medida que se aproxima, se produce un incremento continuo del campo eléctrico en la parte más alta de la estructura hasta cuando se alcanzan las condiciones necesarias para que el conector se forme y emerja. Subsiguientemente, ambos líderes (trazador negativo descendente y conector positivo ascendente), con sus respectivas velocidades, empiezan a “progresar” en cierta dirección hasta que se encuentran finalmente generando así el impacto del rayo en la estructura en cuestión.

De acuerdo con esta teoría, los GM consideran que el enlace exitoso entre el rayo y una estructura en tierra requiere el cumplimiento de las siguientes condiciones:

- ❖ **Criterio I** - Formación de un líder conector ascendente en la estructura a ser impactada por el rayo (*The upward leader inception criterion*).
- ❖ **Criterio II** - Estabilidad en la propagación del conector ascendente hacia el trazador ascendente (*The leader propagation criterion*).
- ❖ **Criterio III** - Conexión exitosa entre ambos líderes (*The junction criterion*).

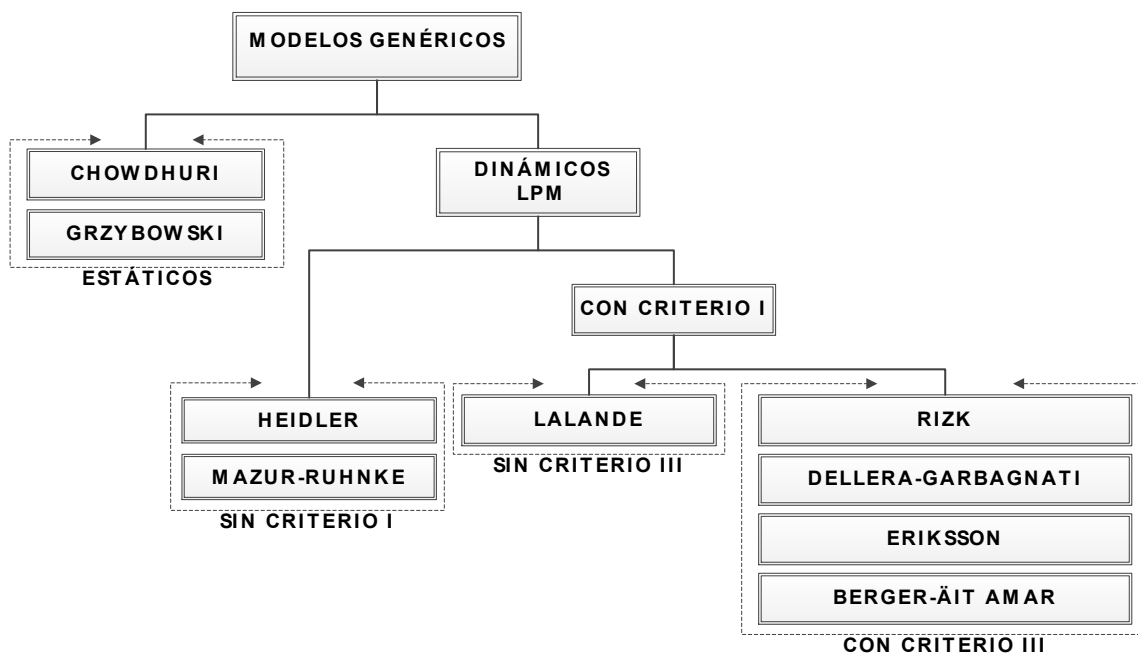
En la [Figura 2-34](#) se ilustran los criterios II y III, (a) y (b) respectivamente. Una vez se ha cumplido con la condición I, el campo y potencial eléctricos se calculan a una distancia fija de las puntas de ambos líderes sobre varias direcciones, dirigiendo el siguiente paso a lo largo de la línea de máximo campo; esto se hace para cada paso del líder escalonado y corresponde con el criterio II. En lo relacionado al criterio III, entre cada paso se calcula el campo eléctrico a lo largo de la línea recta que une las puntas de ambos líderes y luego se compara con el mínimo valor establecido para el campo de propagación del “*streamer*” positivo; de forma que cuando todos los valores son iguales o superiores a éste, entonces se considera que se han alcanzado las condiciones para la unión entre ambos líderes.



**Figura 2-34** Condiciones para que se produzca el impacto según los GM

Como se explicó en el numeral 2.2.3.1, la separación espacial que existe entre la punta del líder descendente y la estructura en la cual se inicia el líder ascendente positivo, se denomina distancia de impacto. Según la teoría electrogeométrica, dicha distancia no es una propiedad intrínseca de la estructura en tierra sino que depende de la corriente de retorno de la descarga. No obstante, las investigaciones que respaldan a los modelos genéricos han mostrado que esta distancia (radial o lateral) depende tanto de la corriente del rayo como de la altura de la estructura.

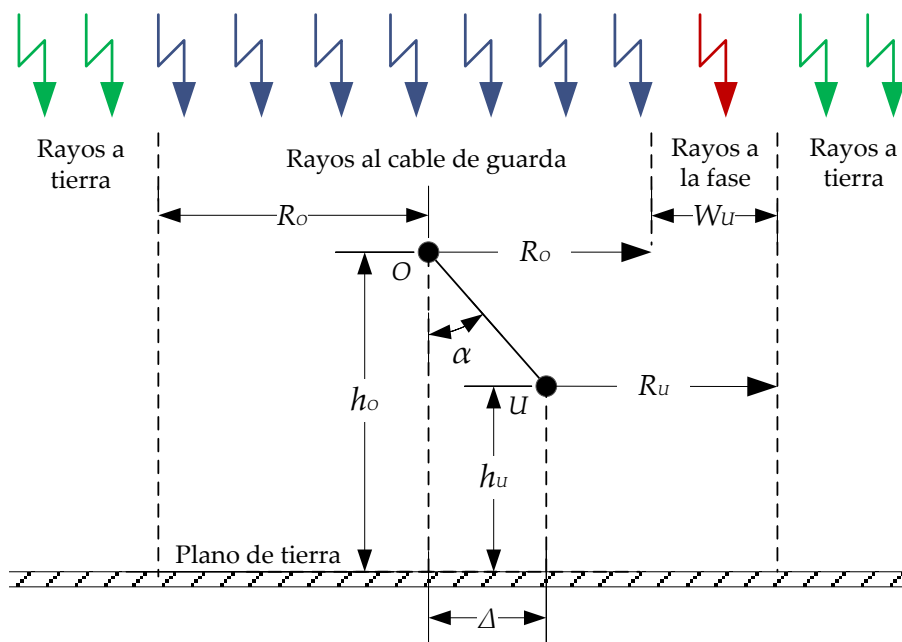
Los GM emplean el concepto de Radio de atracción, definiéndolo como la mayor distancia lateral que puede existir entre la punta del líder descendente y una estructura sin que esta sufra el impacto del rayo. Básicamente, la diferencia entre un modelo y otro radica en el criterio que se tiene para el inicio del líder ascendente, tal como se ilustra en la siguiente Figura 2-36 [27].



**Figura 2-35** Modelos genéricos – Clasificación de Berger & Äit-Amar

### 2.2.3.3.2 Aplicación

La **Figura 2-36** ilustra la aplicación simplificada de los modelos genéricos al estudio del apantallamiento de líneas de transmisión.



**Figura 2-36** Análisis de apantallamiento – Modelos genéricos



De acuerdo con la figura,  $U$  y  $O$  son los puntos de ubicación del conductor de fase y del cable de guarda, respectivamente,  $h_u$  y  $h_o$  corresponden a sus alturas desde el suelo;  $\Delta$  es la separación horizontal entre ambos y  $\alpha$  es el ángulo de apantallamiento. Haciendo un análisis similar al hecho por Rizk [47], la falla de apantallamiento ocurre cuando el trazador del rayo desciende dentro del ancho  $W_u$ , el cual, viene dado por:

$$W_u = \Delta + R_u - R_o \quad (2-29)$$

siendo,  $R_o$  y  $R_o$  los radios de atracción del cable de guarda y del conductor de fase, respectivamente.

A continuación, se presenta una expresión general que, de acuerdo con los modelos genéricos, puede usarse para calcular el radio de atracción de un conductor horizontal suspendido sobre el suelo:

$$R(I_1, h) = (\xi \cdot h^E + \beta) \cdot I_1^F + \zeta \cdot h^G + \delta \quad (2-30)$$

donde,  $R$  [m] es el radio de atracción,  $I_1$  [kA] es la corriente pico de la primera descarga de retorno,  $h$  [m] es la altura, desde el suelo, del conductor. Los valores de los coeficientes  $\xi$ ,  $\beta$ ,  $\zeta$ ,  $\delta$ ,  $E$ ,  $F$  y  $G$  aparecen en la [Tabla 2-2](#), de acuerdo con diferentes autores.

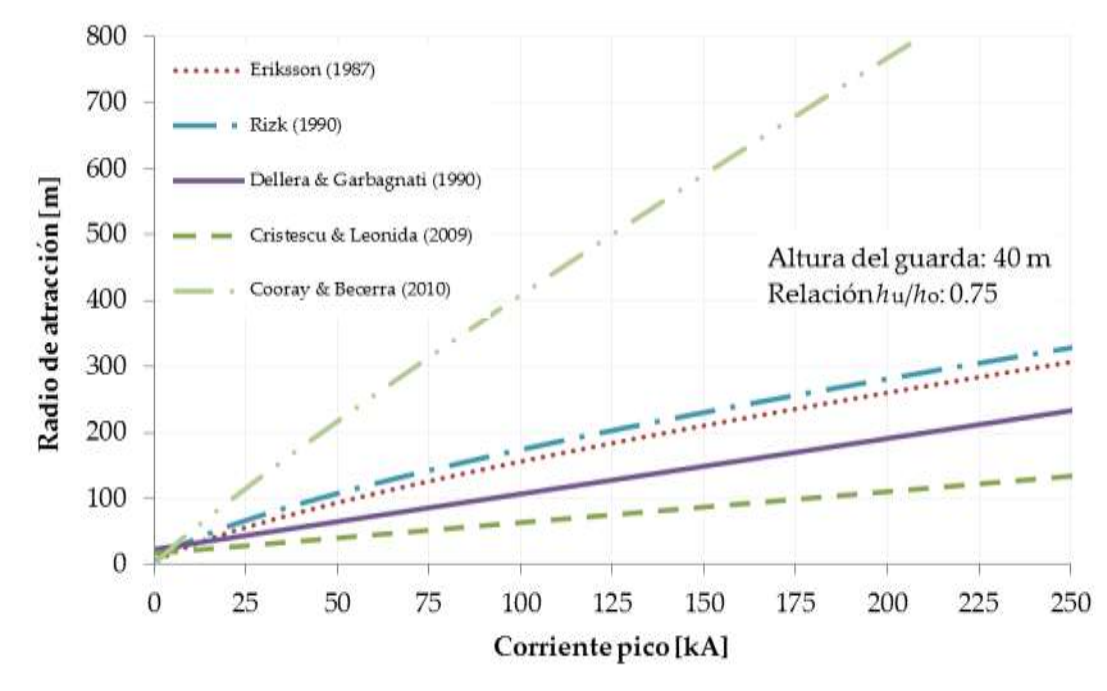
**Tabla 2-2.** Valores de  $\xi$ ,  $\zeta$ ,  $E$ ,  $F$  y  $G$

Modelo Genérico	$\xi$	$\zeta$	$\beta$	$\delta$	$E$	$F$	$G$
Eriksson (1987) [46]	0.67	0	0	0	0.6	0.74	0
Rizk (1990) [47]	1.57	0	0	0	0.445	0.694	0
Dellera & Garbagnati (1990) [49]	0.028	3	0	0	1	1	0.6
Yuan (2001) <sup>a</sup> [82]	52.47	0.35	0	0	0	0.49	1
Cristescu & Leonida (2009) [83]	0.0105	0.3667	0.1474	6.8167	1	1	1
Cooray & Becerra (2010) [84]	2.83	0	0	0	0.23	0.91	0

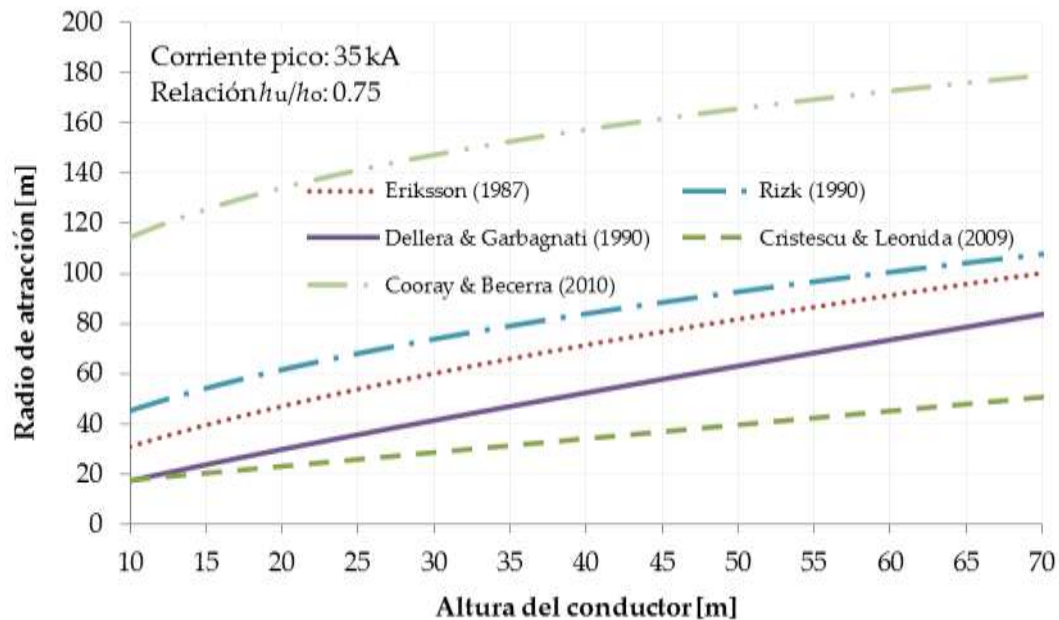
<sup>a</sup>Se usa  $h$  en la ecuación (2-31) como la altura de la estructura menos 13 m.

La mayoría de estos modelos presenta valores diferentes para los coeficientes  $\xi$ ,  $E$  y  $F$ , cuando se trata de estudiar mástiles en vez de conductores horizontales. Esto evidencia la diferencia en la frecuencia con la que los conductores horizontales y verticales atraen los rayos.

Las figuras que siguen, corresponden a las gráficas de las ecuaciones del radio de atracción, para cinco enfoques de los GM:



**Figura 2-37** Radio de atracción vs Corriente de la descarga - GM

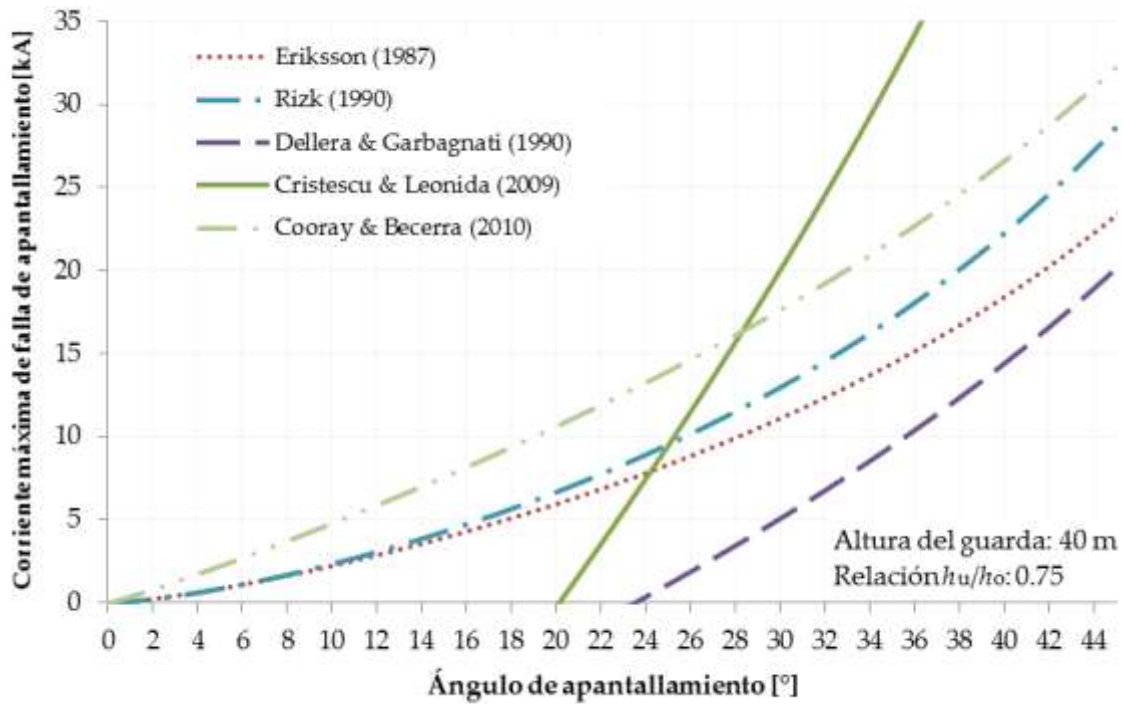


**Figura 2-38** Radio de atracción vs Altura del conductor - GM

De acuerdo con la definición de la corriente máxima de falla de apantallamiento (la que hace  $W_u=0$ ) y al combinar las expresiones (2-29) y (2-30), se tiene que:

$$I_{\max} = \left[ \frac{(h_o - h_u) \cdot \tan \alpha - \zeta \cdot (h_o^G - h_u^G)}{\xi \cdot (h_o^E - h_u^E)} \right]^{\frac{1}{F}} \quad (2-31)$$

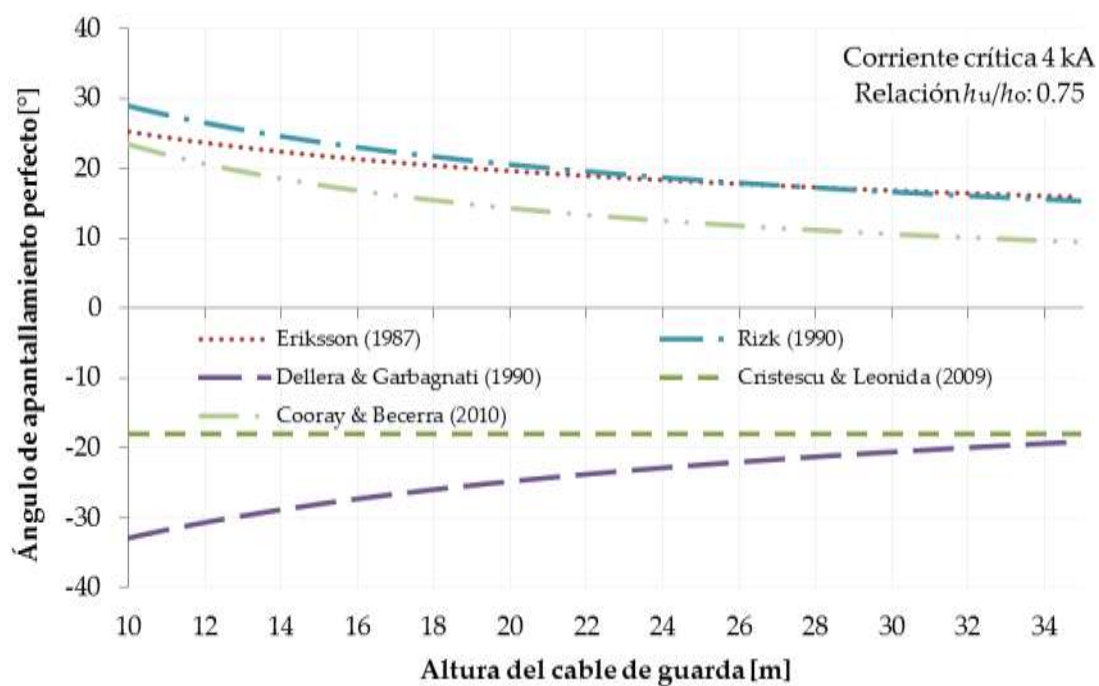
Al observar esta ecuación, puede deducirse que el valor de  $I_{\max}$  se incrementa al aumentar la altura de la línea de transmisión, el ángulo de apantallamiento, pero disminuye cuando aumentan los valores de los coeficientes  $E$ ,  $F$  y  $G$ ; efectos que concuerdan con aquellos deducidos para los EGM.



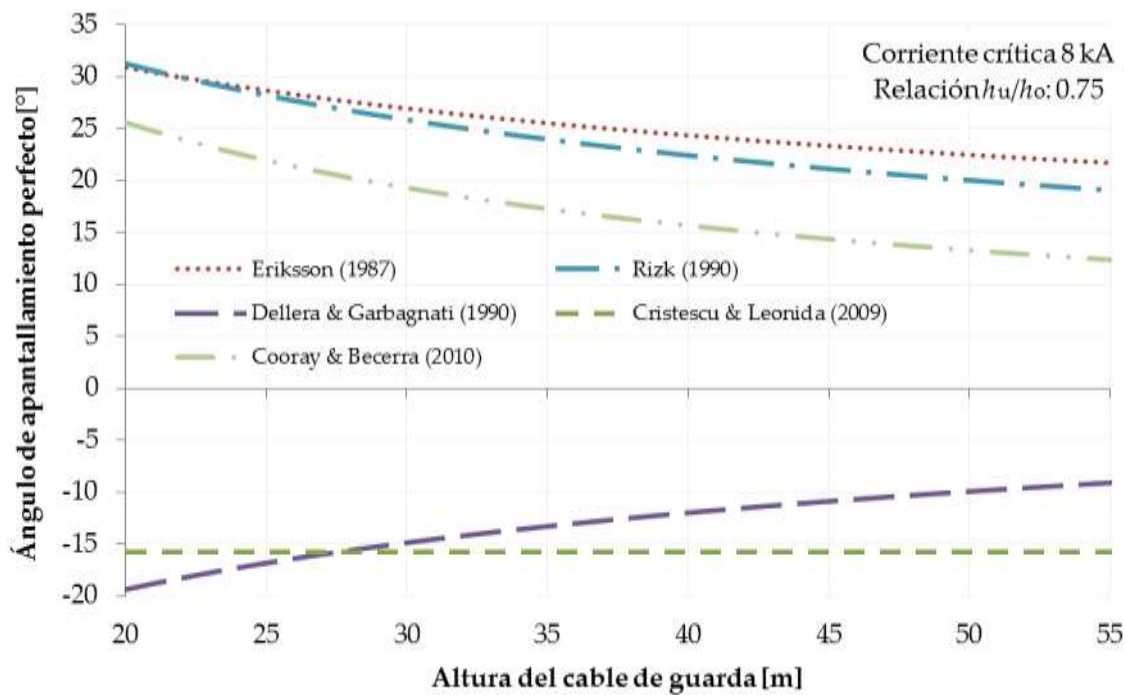
**Figura 2-39** Corriente máxima de falla de apantallamiento - GM

Luego, para una corriente de diseño ( $I_{\max}$ ) igual a la corriente pico que ocasiona flameo ( $I_{\text{crit}}$ ), el ángulo de apantallamiento perfecto se puede calcular por medio de la siguiente expresión:

$$\alpha_{\text{perf}} = \tan^{-1} \left[ \frac{\xi \cdot (h_o^E - h_u^E) \cdot I_{\text{crit}}^F - \zeta \cdot (h_o^G - h_u^G)}{(h_o - h_u)} \right] \quad (2-32)$$



**Figura 2-40** Ángulo de apantallamiento perfecto ( $I_{crit} = 4$  kA) - GM



**Figura 2-41** Ángulo de apantallamiento perfecto ( $I_{crit} = 8$  kA) - GM

#### 2.2.3.4 Aportes recientes

Recientemente, han sido presentadas otras fórmulas que permiten estimar la distancia de impacto a tierra. En 2006, Vargas & Torres propusieron una expresión que fue desarrollada teniendo en cuenta la tortuosidad del canal del líder descendente [85, 86]:

$$S_G(I_1) = 3.9 \cdot I_1^{0.78} \quad (2-33)$$

Luego, en 2007, Cooray, Rakov y Theethayi presentaron la siguiente ecuación [87]:

$$S_G(I_1) = 1.9 \cdot I_1^{0.9} \quad (2-34)$$

Esta fórmula puede ser empleada en el cálculo de la distancia de impacto a una estructura tipo mástil (torre o poste), por ejemplo, siempre y cuando se redefina como la distancia que existe entre las puntas de los líderes ascendente y descendente, justo antes de que se produzca la unión. Aplicando este criterio, Äit-Amar y Berger (2009) modificaron la aplicación del EGM a un mástil cuando presentaron su versión del Método de las esferas rodantes [88].

En la Figura 2-42 se muestran las gráficas para estas nuevas ecuaciones, además de las correspondientes a los EGM clásicos.

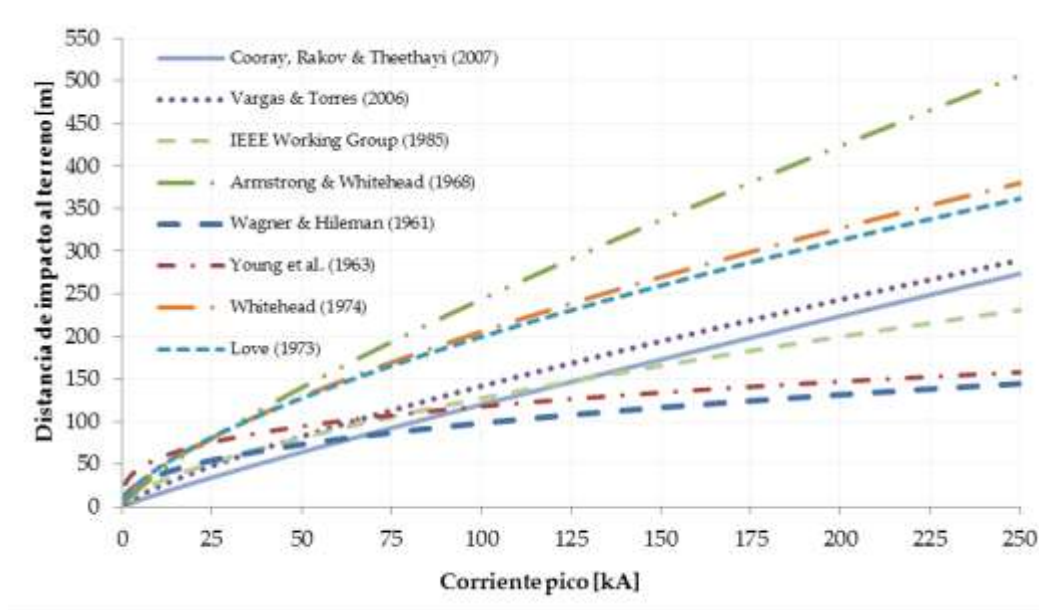


Figura 2-42 Distancia de impacto a tierra, incluyendo aportes de Torres y Cooray

En lo que respecta a la expresión (2-33), es válido anotar lo siguiente:

- ❖ Ha sido adoptada por el estándar colombiano NTC 4552, 2008 [67, 89];
- ❖ Horacio Torres sugiere su utilización para determinar el punto de impacto de un rayo en una línea de transmisión, mediante la aplicación del método electrogeométrico y la aproxima a esta ecuación [19]:

$$S(I_1) = 4 \cdot I_1^{0.8} \quad (2-35)$$

- ❖ El autor considera que, por tener un fundamento físico más sólido del rayo, esta expresión podría darle un enfoque más realista a la teoría electrogeométrica, ya que la mayoría de las versiones del EGM son válidas sólo cuando el canal de la descarga se considera recto.

En 2008, Mikropoulos & Tsovilis, con base resultados de experimentos con modelos a escala, presentaron un enfoque estadístico para el diseño del apantallamiento de líneas de transmisión. Su propuesta se basa en la premisa de que si el rayo es un fenómeno aleatorio, entonces los parámetros que se emplean en el diseño del apantallamiento (distancia de impacto y radio de atracción), deberían considerarse estocásticamente. En su modelo, los autores introducen el concepto de **Radio de intercepción** (*interception radius*), el cual, es una cantidad estadística que varía con la probabilidad de intercepción de rayos; tiene una media, y una desviación estándar. La media está referida al 50% de probabilidad de intercepción, se denomina **Radio crítico de intercepción**,  $R_{ci}$  [m] y se da con referencia a la distancia de impacto al suelo,  $S_G$  [m], así [62, 90]:

$$\left( \frac{R_{ci}}{S_G}, \sigma \right) = c_1 \ln \left( \frac{h}{S_G} \right) + c_2 \quad (2-36)$$

donde,  $h$  [m] es la altura del conductor (o mástil). Los coeficientes  $c_1$  y  $c_2$ , dependen de la polaridad de la descarga:

$$c_1 = \begin{cases} 0.235, & \text{Descargas positivas} \\ 0.272, & \text{Descargas negativas} \end{cases} \quad (2-37)$$

$$c_2 = \begin{cases} 0.90, & \text{Descargas positivas} \\ 1.24, & \text{Descargas negativas} \end{cases}$$

La desviación estándar,  $\sigma$  [%], viene dada por la siguiente expresión:

$$\sigma_{\%} = \begin{cases} 1.9 \cdot \left( \frac{h}{S_G} \right)^{-0.75}, & \text{Descargas positivas} \\ 5.0 \cdot \left( \frac{h}{S_G} \right)^{-0.43}, & \text{Descargas negativas} \end{cases} \quad (2-38)$$

Para una distancia de impacto al suelo determinada ( $S_G$ ), es posible hacer un análisis de apantallamiento conforme los modelos genéricos (véase la [Figura 2-36](#)), donde los radios de atracción del conductor de fase y cable de guarda,  $R_o$  y  $R_u$ , respectivamente, se pueden calcular mediante la ecuación (2-36). Luego, el ancho expuesto viene dado por:

$$W_u = c_1 \cdot S_G \cdot \ln \left( \frac{h_u}{h_o} \right) + \Delta \quad (2-39)$$

La corriente máxima de falla de apantallamiento se calcula utilizando la ecuación que sigue [91]:

$$I_{\max} = \left( \frac{\gamma \cdot (h_o - h_u) \cdot \tan \alpha}{A \cdot c_1 \cdot \ln \left( \frac{h_o}{h_u} \right)} \right)^{\frac{1}{B}} \quad (2-40)$$

Los parámetros  $A$ ,  $B$  y  $\gamma$  han sido previamente definidos en el análisis de los EGM (Véase la [Tabla 2-1](#)). De esta fórmula, se puede inferir que  $I_{\max}$  aumenta con la altura de la línea de transmisión y el incremento en el ángulo de apantallamiento, pero disminuye cuando se incrementan los parámetros  $A$  y  $B$ . Nótese que estos efectos concuerdan con los deducidos del análisis geométrico hecho tanto para los EGM como para los GM.

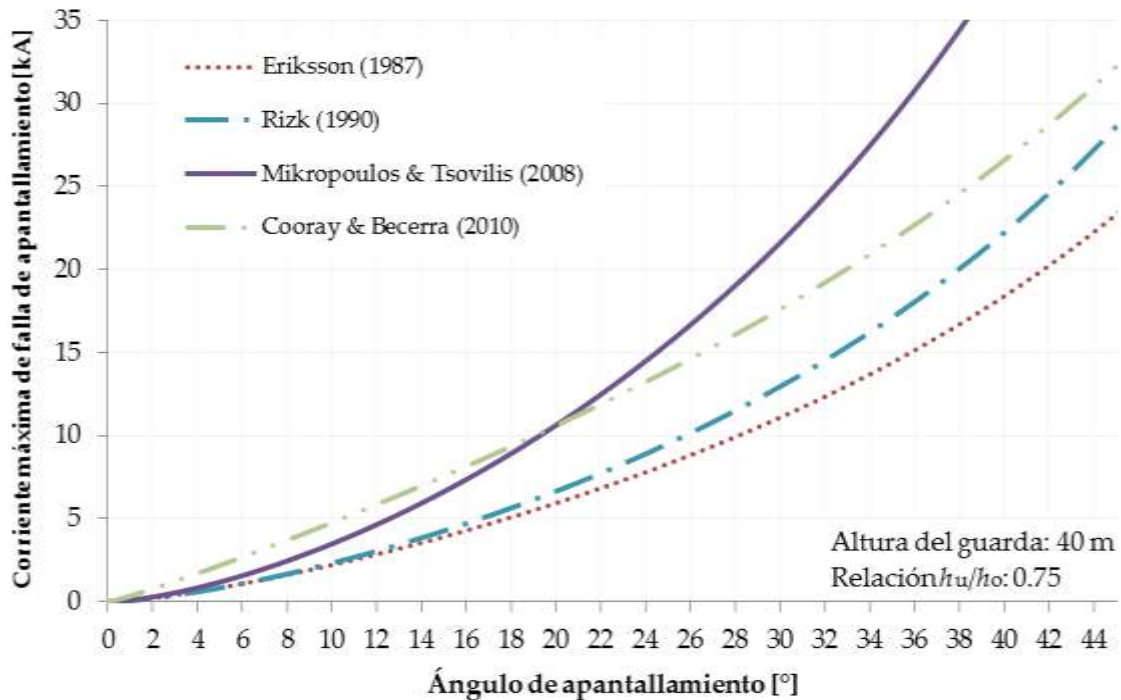
Para calcular el ángulo de apantallamiento perfecto, se emplean las expresiones (2-41) y (2-42). La primera se deriva directamente del análisis geométrico del apantallamiento para los GM; mientras que la segunda ecuación incluye el efecto que, sobre el cable de guarda, tiene la proximidad del conductor de fases [69, 92].



$$\alpha_{\text{perf}} = \tan^{-1} \left[ \frac{A \cdot I^B \cdot c_1 \cdot \ln \left( \frac{h_o}{h_u} \right)}{\gamma \cdot (h_o - h_u)} \right] \quad (2-41)$$

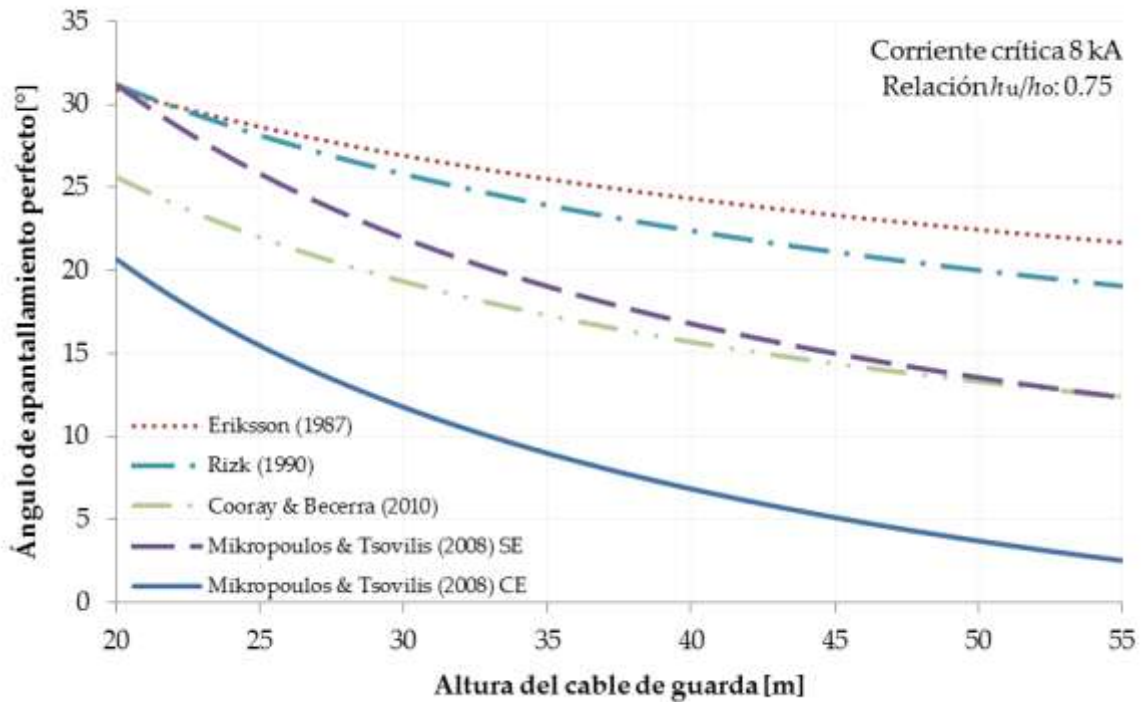
$$\alpha_{\text{perf}} = \tan^{-1} \left[ c_1 \cdot \frac{A \cdot I^B \cdot \ln \left( \frac{h_o}{h_u} \right) - 0.045 h_o^{1.3}}{\gamma \cdot (h_o - h_u)} \right] \quad (2-42)$$

En las figuras que siguen, se muestran las gráficas para  $I_{\text{max}}$  y  $\alpha_{\text{perf}}$ , considerando  $A=10$  y  $B=0.65$  como parámetros de la distancia de impacto a tierra. Para fines comparativos, las gráficas están acompañadas de las correspondientes a los GM más representativos (Eriksson, Rizk y Cooray). Además, en la [Figura 2-44](#) se presentan las gráficas de las ecuaciones (2-41) y (2-42): Sin efecto de proximidad (SE) y con efecto de proximidad (CE), respectivamente.



**Figura 2-43** Corriente máxima de falla de apantallamiento – Modelo estadístico





**Figura 2-44** Ángulo de apantallamiento perfecto– Modelo estadístico

Es importante tener en cuenta que, para una determinada disposición geométrica de la línea, los radios  $R_o$  y  $R_u$  son cantidades estadísticas que, además de variar con la corriente pico y la altura sobre el suelo, lo hacen con la probabilidad de intercepción (2-36). Por lo tanto, el ancho expuesto ( $W_u$ ) está estadísticamente distribuido, lo que indica que tanto la corriente máxima de falla de apantallamiento como el ángulo de apantallamiento perfecto, son cantidades no determinísticas. Por lo expuesto hasta ahora, este nuevo enfoque ha sido denominado por sus autores como “El Modelo Estadístico” (*The Statistical Model*) [93-95].

### 2.2.3.5 Incidencia de rayos sobre la línea

A partir de la ecuación (2-25), asumiendo  $I=35$  kA como el promedio de las corrientes pico de los rayos y teniendo en cuenta la dispersión encontrada en los datos empíricos, Eriksson obtuvo una expresión simplificada para calcular el **Radio equivalente de intercepción** (*equivalent interception radius*) de un conductor horizontal suspendido sobre el suelo [45]:

$$R_{eq} = 14 h^{0.6} \quad (2-43)$$

De acuerdo con la fórmula anterior, el *Área de exposición*,  $A_E$  [km<sup>2</sup>] correspondiente a 100 km de línea es:

$$A_E = \frac{2 \times R_{eq} + W}{1000} \times 100 \text{ km} = \frac{28 \times h^{0.6} + W}{10} \quad (2-44)$$

donde, el valor de  $W$  [m] corresponde a la distancia de separación entre los cables de guarda o, en ausencia de uno de ellos, a cero. Multiplicando el valor de  $A_E$  por la densidad de rayos al terreno,  $GFD$  [rayos/km<sup>2</sup>/año], se obtiene el número de impactos a la línea<sup>45</sup>,  $N_s$  [rayos por 100 km-año] [45]:

$$N_s = GFD \times \frac{28 \times h^{0.6} + W}{10} \quad (2-45)$$

Esta expresión ha sido adoptada por los estándares internacionales IEEE 1243-1997 y IEEE 1410-2010 [12, 71]. Aunque la ecuación es la misma, los resultados pueden diferir un poco, esto puesto que, en el primero  $h$  representa la altura de la torre, mientras que el último, representa la altura del conductor de fase más cercano a la cima del poste. Caso similar cuando se comparan los resultados obtenidos con los programas FLASH y DESCARGA ya que, para el primero,  $h$  es la altura del cable de guarda y para el último, representa la altura de la torre [26].

Es importante destacar que existen otras opciones, destacándose las fórmulas propuestas por Anderson<sup>46</sup> [11]:

$$N_s = GFD \times \frac{34 \times h^{1.09} + W}{10} \quad (2-46)$$

y Rizk [47]:

$$N_s = GFD \times \frac{38 \times h^{0.45} + W}{10} \quad (2-47)$$

<sup>45</sup> Ubicada en terreno plano, sin estructuras vecinas de significativa altura (árboles o edificios).

<sup>46</sup> En realidad fue desarrollada por Whitehead. Anderson la implementó en el llamado Método de la Sombra eléctrica (*Electrical Shadow Method*): Todos los rayos que terminen dentro del ancho de la sombra, el cual está en función de la altura de la línea, impactarán contra ella.

En estas fórmulas,  $h$  [m] es la altura promedio del conductor en el vano y se calcula como la altura de la torre  $h_t$  [m] menos dos tercios de la flecha del conductor a medio vano  $f_c$  [m]:

$$h = h_t - \frac{2}{3} \times f_c \quad (2-48)$$

### 2.2.3.6 Evaluación de la tasa de salidas por fallas de apantallamiento

La tasa de fallas de apantallamiento de una línea para una corriente pico específica,  $SFR_1 | I$ , se define como el número de descargas con corriente  $I$  que impactarán contra los conductores de fase de esa línea durante un año. Para la línea de la [Figura 2-26](#), el cálculo puede hacerse mediante la siguiente expresión:

$$SFR_1 | I = 2 \cdot GFD \cdot \frac{W_u}{1000} \cdot L \cdot f_1(I) \quad (2-49)$$

donde,  $L$  [km] es la longitud de la línea,  $W_u$  [m] es el ancho expuesto del conductor de fase, calculado para una corriente específica  $I$  [kA],  $f_1(I)$  es la probabilidad de que la primera descarga de retorno tenga dicha corriente, y  $GFD$  [rayos/km<sup>2</sup>/año] corresponde a la densidad de rayos a tierra en la zona donde está localizada la línea.

La Tasa total de fallas de apantallamiento de la línea (*Shielding Failure Rate – SFR*), se define como la suma de todas las tasas de falla de apantallamiento para todas las corrientes. Para la figura citada, la  $SFR$  se calcula según:

$$SFR_1 = \frac{2}{1000} \cdot GFD \cdot L \cdot \int_0^{\infty} W_u \cdot f_1(I) \cdot dI \quad (2-50)$$

Como se ha mencionado, deben existir dos límites de integración; un límite inferior,  $I_{min}$ , que corresponde a la corriente mínima esperada para una descarga cualquiera; y un límite superior,  $I_{max}$ , que corresponde al valor de corriente por encima del cual no se presentarán fallas de apantallamiento. De esta forma, la tasa total de fallas de apantallamiento, resulta ser:

$$SFR_1 = \frac{2}{1000} \cdot GFD \cdot L \cdot \int_{I_{min}}^{I_{max}} W_u \cdot f_1(I) \cdot dI \quad (2-51)$$

El valor de  $SFR_1$  representa el número de descargas anuales que impactarán contra el conductor de fases; sin embargo, sólo una porción de estos rayos causarán flameo en los aisladores: las descargas con corriente pico mayor que la corriente crítica,  $I_{crit}$  [kA]. Remplazando  $I_{min}$  por  $I_{crit}$  en la ecuación (2-51), se obtiene la Tasa anual de flameos por fallas de apantallamiento (*Shielding Failure Flashover Rate - SFFOR*) de la línea, según la expresión:

$$SFFOR_1 = \frac{2}{1000} \cdot GFD \cdot L \cdot \int_{I_{crit}}^{I_{max}} W_u \cdot f_1(I) \cdot dI \quad (2-52)$$

El valor de  $SFFOR$  representa el número de descargas anuales que impactarán contra el conductor de fases y además causarán el flameo de los aisladores. Este parámetro también se puede expresar de forma estandarizada como la **Tasa anual de flameos por fallas de apantallamiento para cada 100 km de línea**, así [96]:

$$SFFOR_1 = \frac{2 \cdot GFD}{10} \cdot \int_{I_{crit}}^{I_{max}} W_u \cdot f_1(I) \cdot dI \quad (2-53)$$

Esta fórmula aplica tanto para los EGM como para los GM.

Las expresiones anteriores, requieren de integración numérica, por lo que Anderson propuso una expresión que simplifica el cálculo de la SFFOR [11]:

$$SFFOR_1 = 0.1 \cdot GFD \cdot W_u(I_{crit}) \cdot [P_1(I_{crit}) - P_1(I_{max})] \quad (2-54)$$

siendo,  $W_u(I_{crit})$  el ancho expuesto para la corriente crítica,  $P_1(I)$  la probabilidad de que la corriente pico de la primera descarga de retorno sea mayor que  $I$  (Se evalúan las probabilidades acumuladas para la corriente crítica y para la corriente máxima de falla de apantallamiento).

El cálculo de estas probabilidades se hace por medio de una aproximación a la distribución sugerida por CIGRÉ (1991) [13]:

$$P_1(I) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I}{31}\right)^{2.6}} \quad (2-55)$$

Partiendo de la definición de arco expuesto, haciendo referencia a la [Figura 2-29](#) y empleando la ecuación (2-26), se obtiene una expresión para el cálculo de la *SFFOR* en el IEGM de Eriksson:

$$SFFOR_1 = \frac{2 \cdot GFD}{10} \cdot \int_{I_{crit}}^{I_{max}} QQ' \cdot f_1(I) \cdot dI \quad (2-56)$$

Es pertinente anotar que, Eriksson propuso también un método simplificado para el cálculo de las *SFR* y *SFFOR*, donde ambas se expresan como función de la tasa de impactos a la línea,  $N_s$  [rayos por 100 km-año] [\[46\]](#):

$$SFR_1 = N_s \cdot \int_0^{I_{max}} f_1(I) \cdot dI \quad (2-57)$$

$$SFFOR_1 = N_s \cdot \int_{I_{crit}}^{I_{max}} f_1(I) \cdot dI \quad (2-58)$$

Otro enfoque que merece la pena presentar es el de Byrgcdopf-Koctenko [\[97, 98\]](#), cuya ecuación propuesta es la que sigue:

$$SFFOR_1 = 10^{-4} \cdot N_s \cdot P_1(I) \cdot P_0(\alpha, h)$$

$$\log_{10} P_0 = \alpha \cdot \frac{\sqrt{h_0}}{90} - 2 \quad (2-59)$$

$$\log_{10} P_1(I) = 2 - \frac{I}{60}$$

donde,  $P_0$  es la probabilidad de que falle el apantallamiento (función del ángulo de protección,  $\alpha$ , y de la altura del cable de guarda,  $h_0$ ),  $P_1$  es la probabilidad de que la corriente de la descarga sea excedida (fórmula empírica de Burgsdorf) y  $N_s$  corresponde al número de impactos a la línea y viene dado por [\(2-45\)](#).

#### 2.2.4 Ángulo de apantallamiento efectivo

El objetivo de seleccionar la cantidad y ubicación de los cables de guarda para una línea de transmisión es reducir, a un nivel admisible, el número de flameos por fallas de apantallamiento. Determinar la ubicación del cable de guarda, con base en el criterio del Ángulo de apantallamiento perfecto puede resultar en diseños poco prácticos y además antieconómicos. Por lo tanto, los diseños deberían basarse en el criterio del *Ángulo de apantallamiento efectivo*, es decir, aquél ángulo para el cual

existe un valor aceptable (no nulo) del *SFFOR*. En general, se recomienda un valor de diseño para el *SFFOR* de 0.05 por cada 100 km-año [78].

## 2.3 Conclusiones

En este capítulo se ha expuesto la formulación y el método general para el análisis geométrico de la falla de apantallamiento con base en varios modelos de enlace del rayo con las líneas de transmisión. Se comprobaron y presentaron expresiones matemáticas para determinar la corriente máxima de falla de apantallamiento y el ángulo de apantallamiento perfecto, conceptos claves a la hora de evaluar el desempeño de una línea ante el fenómeno del rayo. Se dedujo que la corriente máxima de falla depende de la disposición de los conductores y el cable de guarda a lo largo del corredor de la línea; por lo que, bajo el supuesto de que esta disposición permanezca invariante, se presenta una gran variabilidad en el valor de  $I_{\max}$  a través de los modelos de enlace estudiados.

Los modelos de enlace presentados se dividen en dos grupos conforme la explicación física en la que se fundamentan, a saber: Modelos Electrogeométricos y Modelos Genéricos<sup>47</sup>. Los primeros emplean el concepto de distancia o radio de impacto, mientras que los otros, el concepto de radio de atracción. Aunque se trata de conceptos diferentes, coinciden en revelar la capacidad que tienen las líneas de transmisión para atraer rayos.

Varias de las ecuaciones para calcular el radio de atracción se obtuvieron a partir del análisis de mástiles y no de conductores horizontales, por lo que su empleo en el análisis de líneas de transmisión puede resultar inapropiado. Así mismo, hay que considerar que la mayoría de las expresiones que existen para calcular la distancia de impacto fueron derivadas a partir de estudios para líneas de transmisión, pero su aplicación puede resultar limitada ya que no dependen de la altura del conductor sobre el suelo.

Aunque los modelos genéricos están mejor orientados a la física del fenómeno del rayo, son los modelos electrogeométricos los que han probado su efectividad en el análisis del comportamiento de las líneas de transmisión ante las descargas eléctricas atmosféricas<sup>48</sup>. Hoy en día, los modelos genéricos no gozan de la

---

<sup>47</sup> El Modelo de Eriksson se expuso como la transición entre los electrogeométricos y los genéricos.

<sup>48</sup> Estos modelos funcionan muy bien en las líneas de transmisión debido a la esbeltez de los apoyos.

popularidad de los modelos electrogeométricos, los cuales se mantienen como principal herramienta de análisis de la falla de apantallamiento. Es por esto, que el autor piensa que el EGM puede mejorarse a través de modelos que no estén limitados a descargas negativas solamente y cuyas ecuaciones para el radio de impacto sean dependientes, además de la corriente de la descarga, de la altura del conductor sobre el suelo.

La suposición de que tanto el ángulo de apantallamiento como la altura del conductor de fase sobre el suelo permanece invariante a lo largo del recorrido de la línea, puede resultar en errores a la hora de evaluar la tasa de salidas por fallas de apantallamiento, incluso para líneas que discurren por terreno plano. Por consiguiente, es válido suponer que el método electrogeométrico puede mejorarse al tener en cuenta la variación en las alturas de los conductores respecto de la cota del terreno, tanto por topografía longitudinal como transversal.

Finalmente, el análisis geométrico presentado corresponde a formulaciones cuya validez se limita a descargas verticales; lo cual está alejado de la realidad. Por ende, resulta útil conocer la probabilidad de ocurrencia del ángulo de aproximación del rayo  $y$ , además, adaptar el análisis geométrico del arco de perforación del apantallamiento para así determinar el ancho expuesto de la línea bajo estas condiciones.

# 3

## PROPUESTA PARA EVALUAR LA SFFOR EN ZONAS DE TOPOGRAFÍA MONTAÑOSA

---

La falla de apantallamiento ocurre cuando el rayo no impacta en el cable de guarda, sino que lo hace en el conductor de fase. En el capítulo anterior se analizó la falla de apantallamiento a partir de los diversos modelos de enlace del rayo con las estructuras en tierra. No obstante, la mayoría de las fórmulas presentadas están referidas a conductores horizontales, terreno plano y descargas verticales negativas; consideraciones que no reflejan la realidad de una línea de transmisión que discurre por terreno montañoso, donde la posición relativa de los conductores respecto del terreno varía a lo largo de cada vano.

En el presente capítulo, con base en el método electrogeométrico, se presenta un modelo matemático que permite calcular la tasa de salidas por fallas de apantallamiento de una línea de transmisión, teniendo en cuenta la flecha de los conductores (alturas relativas al suelo), la topografía del terreno (perfiles laterales y longitudinales), la polaridad de la descarga (rayos negativos y positivos), ángulo de aproximación del rayo (descargas no verticales) y descargas subsecuentes (más de una descarga de retorno).

Primero se hace referencia a los parámetros del rayo que aplicarían para zonas de topografía montañosa

, tal como los que se encuentran en el interior de Colombia. Luego, se presenta un modelo de enlace que, explícitamente, tiene en cuenta la altura de cada conductor sobre el suelo, la distancia de impacto a tierra y la polaridad de la descarga. Por último, se proponen las ecuaciones que, de manera general, permitirían la aplicación de cualquier versión del EGM al análisis de la falla de apantallamiento en terreno montañoso.

### 3.1 Parámetros del rayo

Las magnitudes de los parámetros del rayo empleados en aplicaciones de ingeniería varían espacial y temporalmente [22]. Estos parámetros son: Nivel



ceráunico, Densidad de descargas a tierra, Amplitud y Forma de impulso de la corriente de retorno, Polaridad y Multiplicidad.

### 3.1.1 Incidencia

El efecto de los rayos sobre una línea de transmisión depende principalmente de la ocurrencia del fenómeno natural sobre la zona de emplazamiento de la línea; conforme mayor sea la actividad de rayos en el área que ésta atraviesa, aumenta así la probabilidad de que se produzcan los flameos. La cantidad de rayos que inciden al año en un lugar determinado se conoce como Nivel ceráunico<sup>49</sup>.

En la década de los 90, con los primeros estudios de la actividad eléctrica atmosférica realizados en Colombia, se hizo una aproximación de las características del rayo tanto a nivel espacial como temporal. De estas investigaciones surgieron los mapas de niveles ceráuneos en el país, donde se podían identificar las regiones más críticas en cuanto a la alta actividad de rayos, es decir, aquellas que, según los isoniveles presentan el mayor número de días de tormenta al año. La [Figura 3-1](#) muestra la variación espacial de los valores de días tormentosos al año a lo largo y ancho de la geografía colombiana<sup>50</sup> [89].

La Densidad de Descargas a Tierra DDT (*Ground Flash Density* - GFD) se define como el número promedio de rayos nube-tierra por unidad de área y por unidad de tiempo en un sitio determinado. La DDT normalizada se expresa en rayos/km<sup>2</sup>-año y se considera como el primer indicador de la incidencia de rayos en una región. Típicamente, la DDT se puede determinar por mediciones directas o por fórmulas empíricas. Las primeras incluyen las medidas de contadores de rayos, sistemas de localización de rayos y sistemas ópticos instalados en satélites [20, 22, 99]. En la Figura se muestra un mapa de la DDT para el territorio colombiano.

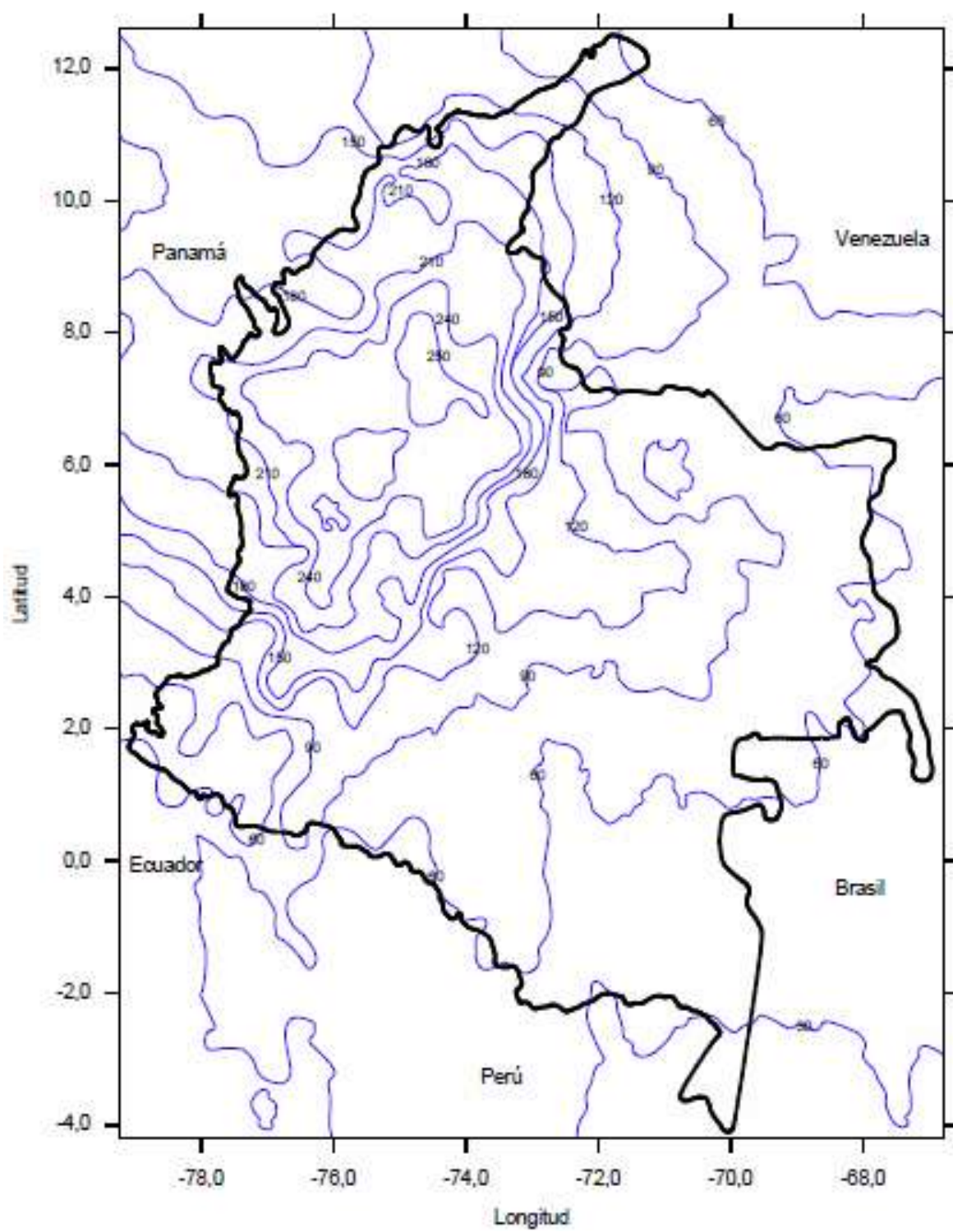
Es de interés anotar que sólo hasta 1997 se empezó a medir la GFD en el país, mediante una red de detección y localización de rayos<sup>51</sup>, la cual contaba con 6 sensores instalados principalmente en la región Andina. De esta forma se logró publicar un primer mapa de este parámetro en el año 2002 (ver [Figura 3-2](#)) [100].

---

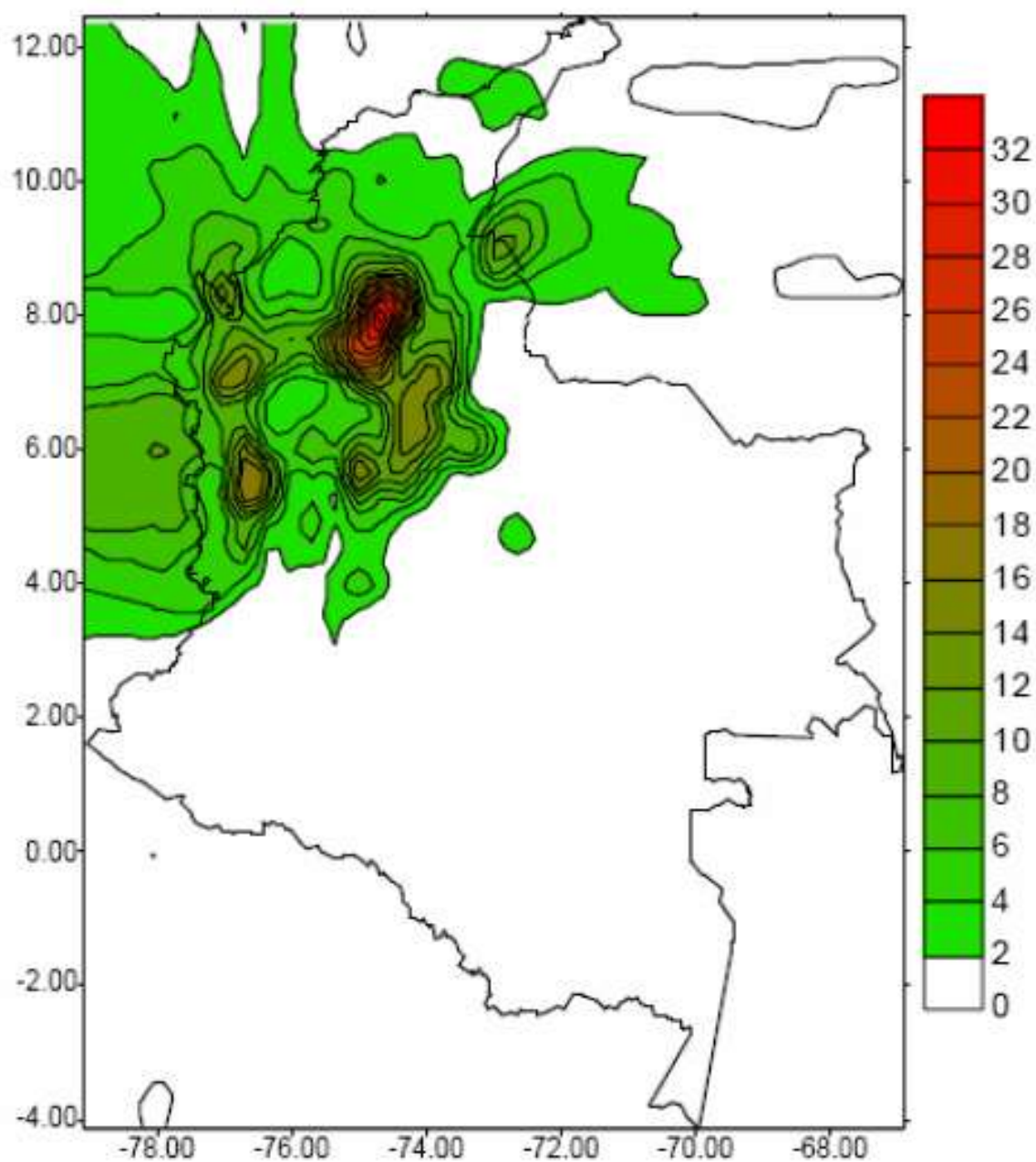
<sup>49</sup> En una definición formal, el Nivel ceráunico es el número promedio de días al año durante los cuales se escuchan truenos y además se observan relámpagos en un sitio específico.

<sup>50</sup> Se trata de un mapa que fue elaborado por el convenio Universidad Nacional de Colombia e Interconexión Eléctrica S.A. E.S.P. (ISA), con base en el Sistema de Información de Descargas de ISA.

<sup>51</sup> Actualmente bajo la administración de ISA. Esta red estuvo operando durante el período 1997-2001.



**Figura 3-1** Mapa de isoniveles cerámicos para Colombia (NTC 4552-1)



**Figura 3-2** Mapa de Densidades de Descargas a Tierra (*GFD*)

Si el mapa de *GFD* no está disponible, entonces este parámetro se puede calcular mediante las ecuaciones empíricas propuestas en la literatura abierta sobre el tema. Tales ecuaciones presentan la siguiente arquitectura:

$$GFD = 0.001 \times k \times (NC)^T \quad (3-1)$$

En la expresión anterior,  $NC$  es el nivel ceráunico [días con tormenta al año],  $k$  y  $T$  son constantes cuyo valor depende del autor de la fórmula, tal como se indica a continuación [100]:

**Tabla 3-1.** Ecuaciones de la  $GFD$  en función del Nivel ceráunico

Autor	$k$	$T$
Eriksson (Africa)	53	1.17
Eriksson (IEEE)	40	1.25
Brown (USA)	150	1
Aiya (IEC)	100	1
Anderson	140	1
Horn (USA)	170	1
Torres (Colombia)	1.7	1.56

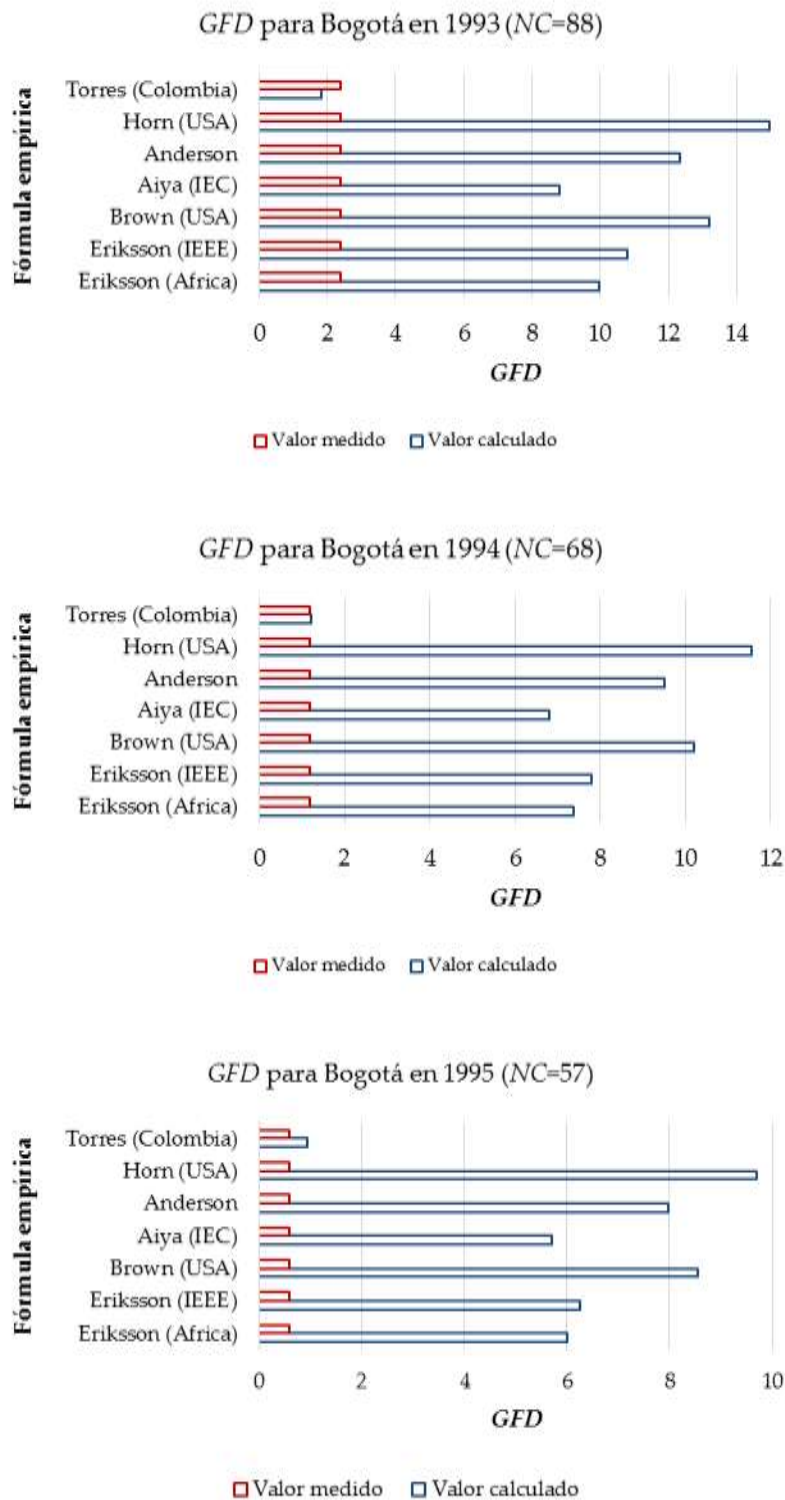
El Dr. Horacio Torres<sup>52</sup> recomienda que la magnitud de los parámetros del rayo adoptados en la normativa internacional<sup>53</sup> no se apliquen directamente a zonas tropicales, más bien, se deben emplear aquellos obtenidos de investigaciones a nivel local. Las propuestas de Eriksson (IEEE) y Aiya (IEC) aplican para las regiones en las zonas templadas del globo terráqueo; mientras que para las zonas tropicales, la  $GFD$  debería calcularse usando los resultados encontrados en regiones montañosas, a saber [70, 101]:

$$\begin{aligned}
 GFD &= 0.0017 \times k \times (NC)^{1.56}; & \text{Colombia} \\
 GFD &= 0.03 \times k \times (NC)^{1.12}; & \text{Brazil} \\
 GFD &= 0.024 \times k \times (NC)^{1.12}; & \text{México}
 \end{aligned}
 \tag{3-2}$$

La **Figura 3-3** muestra la comparación de los resultados arrojados por las distintas fórmulas para calcular la  $GFD$ , aplicadas al caso colombiano, específicamente para datos medidos en Bogotá DC durante el período 1993-1995.

<sup>52</sup>Convener del Cigré Task Force C4.4.04B Lightning in Tropical Regions. Director PAAS-UN.

<sup>53</sup> Estimados regionalmente en zonas templadas del planeta.



**Figura 3-3** Comparación de resultados de expresiones empíricas para calcular la *GFD*

Como procedimiento general, en concordancia con la literatura y los estándares internacionales, el autor propone que una vez obtenida la densidad de rayos a tierra, se estime el número de descargas que inciden en la línea (descargas a los conductores, descargas a las torres o descargas al cable de guarda), teniendo en cuenta que, depende de la mayor o menor área de exposición de la línea, la cual a su vez, está determinada por la altura y forma de la estructura, la disposición de los conductores y del cable de guarda, las características topológicas del corredor y la magnitud de la corriente de descarga.

Actualmente existe una nueva red de medición de descargas eléctricas atmosféricas en Colombia llamada LINET. Esta nueva red está operando con 10 antenas ubicadas en diferentes puntos de la geografía colombiana, la antena que se encuentra más al norte está en Barranquilla y la antena más al sur está en Pasto. La red empezó a funcionar en el año 2011 y actualmente se están calculando los diferentes parámetros del rayo a partir de los datos de esta red.

### 3.1.2 Polaridad

Es importante recordar que las ecuaciones tradicionales para el cálculo de la distancia de impacto están concebidas para descargas negativas solamente; la justificación está en que el 90% de los rayos nube-tierra registrados en el mundo son negativos. La incidencia de descargas positivas aumenta durante el invierno y está favorecida por ciertas condiciones espaciales (latitudes altas, grandes elevaciones y tormentas severas) [20, 102-104]. No obstante, de acuerdo con la NTC 4552, en Colombia se ha encontrado que los rayos positivos dependen no solamente de condiciones espaciales sino de condiciones temporales (estación y hora de presentación de la tormenta), además la distribución de polaridades promedio multianuales (1997-2001) en Colombia es [67]: 67.28% negativos y 32.72% positivos<sup>54</sup>. Esto sugiere la conveniencia de tener en cuenta la polaridad de la descarga a la hora de evaluar el desempeño de las líneas de transmisión frente al fenómeno del rayo.

Considerando la polaridad del rayo, la siguiente es la propuesta del autor para el cálculo de la tasa de salidas de la línea por fallas de apantallamiento, *SFFOR*:

$$SFFOR = N^{(-)} \times SFFOR^{(-)} + (100 - N^{(-)}) \times SFFOR^{(+)} \quad (3-3)$$

---

<sup>54</sup>Grupo de investigación PAAS-UN de la Universidad Nacional de Colombia y la Red Colombiana de Localización de Rayos (RECMA).



donde, los superíndices indican si el rayo es negativo o positivo y, el factor  $k$ , indica el porcentaje de descargas con cierta polaridad; por ejemplo, en el caso colombiano, sería  $N^{(-)}=67.28\%$ .

### 3.1.3 Distribución de probabilidad de la corriente del rayo

Las variaciones estadísticas de la corriente pico de la primera descarga de retorno de un rayo negativo,  $I_1$ , pueden modelarse a través de la distribución de probabilidad tipo log-normal [103]. La función de densidad de probabilidad,  $f_1(I)$ , a la que se hizo referencia en el numeral 2.2.3.6, se puede expresar así:

$$f_1(I) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot I \cdot \sigma_{\ln I}} e^{-0.5 \cdot \left( \frac{\ln I - \ln \bar{I}}{\sigma_{\ln I}} \right)^2} \quad (3-4)$$

siendo,  $\sigma_{\ln I}$  la desviación estándar de  $\ln I$  e  $\bar{I}$  la media de la corriente de retorno de la descarga. La probabilidad acumulada, es decir, aquella que tiene en cuenta corrientes superiores a un determinado valor,  $P_1(I > I_p)$ , puede calcularse por medio de la siguiente expresión:

$$P_1(I_p) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_u^{\infty} e^{-u^2} du = \text{erfc}(u) \quad (3-5)$$

$$u = 0.5 \cdot \left( \frac{\ln I - \ln \bar{I}}{\sigma_{\ln I}} \right)$$

Siendo,  $I_p$  la corriente esperada (prospectiva) de la primera descarga de retorno del rayo.

Respecto de los parámetros estadísticos,  $\bar{I}$  y  $\sigma_{\ln I}$ , Anderson y Eriksson (1980) dividieron la distribución log-normal en dos subdistribuciones, así [105]:

**Tabla 3-2.** Parámetros estadísticos para la primera descarga de retorno (Cigré)

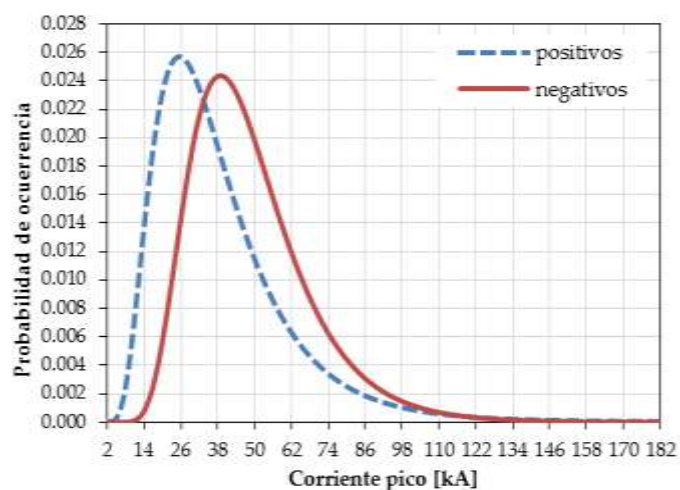
Parámetro	Dominio del SFFOR $I \leq 20 \text{ kA}$	Dominio del BFOR $I > 20 \text{ kA}$
Media [kA]	61	33.3
Desviación estándar logarítmica	1.33	0.605

Por otro lado, Martínez-Velasco y Castro-Aranda (2006), recomiendan emplear los siguientes valores base [106]:  $\bar{I} = 34 \text{ kA}$  y  $\sigma_{\ln I} = 0.740$  para la polaridad negativa,

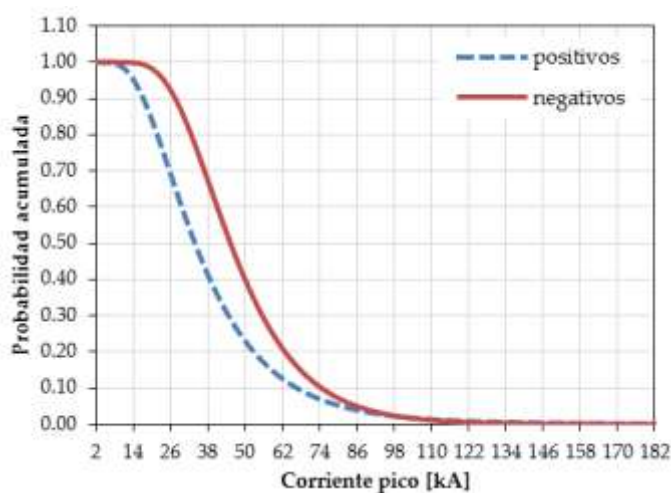
mientras que  $\bar{I} = 40$  kA y  $\sigma_{lnI} = 0.980$  para la positiva. En lo referente al caso colombiano, la normativa vigente (NTC 4552-1) recomienda los valores medios y de dispersión que se indican en la [Tabla 3-3](#) [89].

**Tabla 3-3.** Parámetros estadísticos del rayo para Colombia

Parámetro	Media	Dispersión
	$\bar{I}$	$\sigma_{lnI}$
Primera descarga negativa corta	45.3	0.390
Descarga subsecuente negativa corta	16.3	0.510
Primera descarga positiva	33.9	0.527



**Figura 3-4** Densidad de probabilidad dependiendo de la polaridad del rayo



**Figura 3-5** Probabilidad acumulada dependiendo de la polaridad del rayo



En [Figura 3-4](#) se muestra la gráfica de la función de densidad de probabilidad de la amplitud de la corriente de retorno del rayo, conforme los parámetros recomendados para aplicarse en territorio colombiano, tanto para descargas negativas como positivas, mientras que, en la [Figura 3-5](#) se ilustra la función de probabilidad acumulada asociada.

### 3.1.4 Multiplicidad

Los rayos están constituidos por múltiples descargas de retorno<sup>55</sup>. En la literatura científica se han reportado porcentajes de ocurrencia de multiplicidad muy diferentes: Anderson y Eriksson 55% [\[105\]](#); Cooray y Pérez 82% [\[107\]](#), Rakov et al. 83% [\[108\]](#) y Diendofer et al. 60% [\[109\]](#). Menos del 10% de descargas positivas han presentado multiplicidad [\[103\]](#); pero ya que los registros de rayos positivos son relativamente escasos, entonces se asume que se trata de rayos conformados por una sola descarga. También se asume que, en promedio, los rayos con polaridad negativa no presentan más de tres descargas consecutivas [\[11\]](#).

Aunque los rayos negativos presentan multiplicidad, sólo la primera y segunda descarga de retorno se consideran de interés en el cálculo de la tasa de salidas de las líneas de transmisión; por ejemplo, las magnitudes de la corriente pico para la tercera y cuarta descarga de retorno son mucho menores que la de las dos primeras descargas, por lo que, no constituyen propiamente una “amenaza” para las líneas siempre y cuando la primera descarga de retorno no ocasione flameo [\[106\]](#). Esta premisa es ampliamente aceptada por la comunidad ingenieril, pero puede que no sea correcta ya que si las corrientes pico de las descargas subsecuentes son independientes<sup>56</sup> de la corriente de la primera descarga de retorno, entonces existe la probabilidad de que una de éstas pueda causar flameo aun cuando no lo logre la primera<sup>57</sup> [\[78\]](#).

Es práctica común que el efecto de las descargas subsecuentes no se considere para evaluar la tasa de salidas de las líneas; sin embargo, estudios recientes (Visacro et al. [\[110\]](#)) recomiendan tener en cuenta el aporte de este tipo de descargas, sobre todo, si se trata de estructuras con alturas superiores a los 30 m y puestas a tierra con resistencia inferior a 20  $\Omega$ .

---

<sup>55</sup> No más de 8 descargas de retorno por rayo (polaridad negativa).

<sup>56</sup> No existe correlación entre la corriente de la primera descarga de retorno y las descargas subsecuentes.

<sup>57</sup> Esto, si la corriente pico de la descarga subsecuente o consecutiva presenta un magnitud que excede  $I_c$ .

**Nota:** Este valor de resistencia de puesta a tierra corresponde con el máximo exigido por la legislación Colombiana (RETIE) [111].

Por lo expuesto hasta aquí, puede inferirse que la tasa total de fallas de apantallamiento se puede definir como la suma de la  $SFFOR_1$  (primera descarga) y la  $SFFOR_s$  (tasa de salidas debida a las descargas subsecuentes), así:

$$SFFOR_T = SFFOR_1 + SFFOR_s \quad (3-6)$$

con

$$SFFOR_s = \frac{2 \cdot GFD}{10} \cdot P_s \cdot \int_{I_{\min}}^{I_{\text{crit}}} W_u \cdot f_1(I) \cdot dI \quad (3-7)$$

**Nota:** La expresión (3-7) aplica para la línea de la Figura 2-26.

$P_s$  es la probabilidad de ocurrencia de flameo causado por una descarga de retorno subsecuente, dado que la primera descarga no lo ocasionó. Viene dada por [12, 96]:

$$P_s = \sum_{n=2}^{\infty} P_n \left\{ 1 - \left[ 1 - P(I_s > I_{\text{crit}}) \right]^{n-1} \right\}$$

$$P(I_s > I_{\text{crit}}) = \frac{1}{1 + \left( \frac{I_{\text{crit}}}{12} \right)^{2.7}}; I_{\min} < I_{\text{crit}} < 30 \text{ kA} \quad (3-8)$$

donde,  $P_n$  es la probabilidad de ocurrencia de  $n$  descargas/rayo e  $I_s$  [kA] es la corriente pico de la descarga subsecuente,  $s$ . Algunos valores sugeridos para  $P_n$  y  $P_s$  son 0.7 [96] y 0.5 [78], respectivamente. De acuerdo con esto, se puede inferir que aunque la contribución de  $SFFOR_s$  es pequeña, existe y, por lo tanto, el apantallamiento perfecto ( $SFFOR_T = 0$ ) es muy difícil de lograr.

### 3.2 El Modelo de enlace

De conformidad con lo expuesto en el numeral 2.2.3, para determinar con exactitud el punto de impacto de un rayo sobre una línea de transmisión es necesario considerar el desarrollo de ambos líderes: descendente (escalonado) y ascendente (conector). Los modelos electrogeométricos asumen que el rayo se enlazará con el

punto de la línea que primero halle dentro de una distancia crítica<sup>58</sup> (o distancia de impacto). Por otro lado, los modelos genéricos consideran que el enlace del líder descendente con la línea, se logra por la intervención de un líder ascendente que, debido al campo eléctrico generado por el primero, emerge de la estructura a ser impactada por el rayo (apoyo, cable de guarda o conductor de fase).

En el caso de un conductor horizontal, los modelos genéricos han evidenciado que el radio de atracción determina los límites de la zona en la cual un líder descendente será “capturado” por el conductor y que el valor de este radio depende tanto de la corriente pico de la descarga como de la altura del conductor. Eriksson y Rizk, con base en una regresión de resultados obtenidos por simulación computarizada, propusieron (cada uno) una fórmula con la siguiente arquitectura [46, 47] :

$$R(I_1, h) = A \cdot I_1^B \cdot h^C \quad (3-9)$$

siendo,  $R$  el radio de atracción del conductor,  $I_1$  la corriente esperada de la primera descarga de retorno para un líder descendente negativo,  $h$  la altura sobre el suelo a la que está suspendido el conductor y  $A$ ,  $B$  y  $C$  constantes cuyo valor depende del modelo (Eriksson o Rizk).

Es importante recordar que el radio de atracción,  $R$ , se refiere a una distancia horizontal, paralela al plano de tierra, medida desde el objeto a ser impactado por el rayo hasta la punta del líder descendente. Por ende, al hacer una analogía con los modelos electrogeométricos, este radio se asemeja a la distancia lateral atractiva,  $R_{EGM}$ , la cual depende de la distancia de impacto,  $S$ , así:

$$R_{EGM}(I_1, h) = \begin{cases} \sqrt{S^2(I_1) - [S_G(I_1) - h]^2}, & S_G > h \\ S, & S_G \leq h \end{cases} \quad (3-10)$$

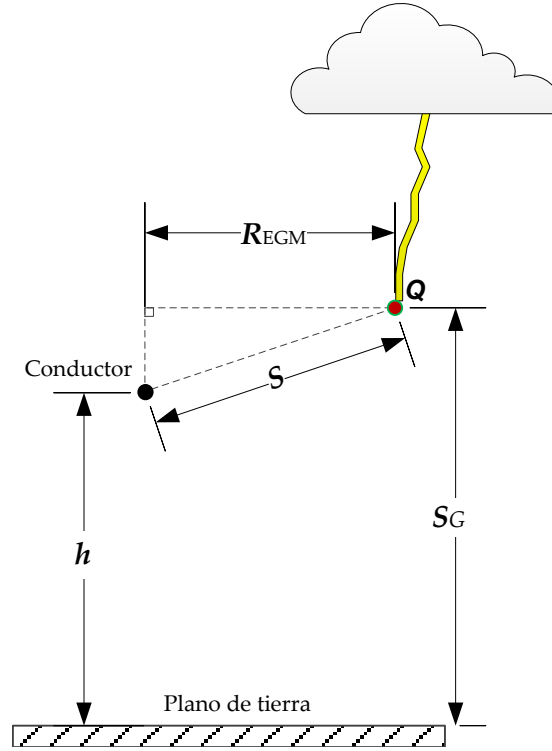
En la expresión anterior,  $S$  y  $S_G$  son las distancias de impacto al conductor y al terreno, respectivamente.

En la Figura 3-6, se muestra un conductor horizontal suspendido a una altura  $h$  sobre el suelo y además conectado a tierra. En un análisis similar al hecho por Rizk en [112], se puede notar que tanto  $R$  (3-9) como  $R_{egm}$  (3-10) dependen de  $I_1$  y de  $h$ ,

---

<sup>58</sup> Distancia medida desde la punta del líder escalonado.

pero la sensibilidad de ambos ante esas variables no es la misma; de hecho, en (3-9) cuando  $I_1 < h$  se tiene que  $R_{\text{egm}}(I_1)$ , viene a ser independiente de  $h$ , lo cual contradice (3-10).



**Figura 3-6** Concepto de distancia lateral atractiva

Considerando que el radio de atracción aumenta en presencia del líder conector, Cooray y Becerra emplearon el modelo SLIM (*Self consistent Lightning connecting leader Inception and propagation Model*) con el propósito de obtener una expresión para el radio de atracción,  $R_{\text{SLIM}}$ , a partir de la distancia lateral atractiva,  $R_{\text{EGM}}$  [113]:

$$\begin{aligned} R_{\text{SLIM}} &= R_{\text{EGM}} \cdot (1 + \Lambda) \\ \Lambda &= 6.51 \cdot 10^{-3} \cdot h \end{aligned} \tag{3-11}$$

siendo,  $\Lambda$  el error que resulta de no considerar la presencia del líder ascendente (o conector) en el modelo electrogeométrico. Este error es función de la altura del conductor porque el valor calculado para  $R_{\text{SLIM}}$  se incrementa en comparación del valor calculado de  $R_{\text{EGM}}$ , a medida que aumenta  $h$ .

Es pertinente tener en cuenta que muchas de las fórmulas que se han propuesto para el cálculo del radio de atracción, se obtuvieron a partir del análisis de mástiles

y no de conductores horizontales, por lo que su empleo en el análisis de líneas de transmisión puede resultar inapropiado. Así mismo, hay que considerar que la mayoría de las expresiones que existen para calcular la distancia de impacto fueron derivadas a partir de estudios para líneas de transmisión, pero su aplicación puede resultar limitada ya que no dependen de la altura del conductor sobre el suelo.

Como se ha visto hasta ahora, los conceptos de distancia de impacto y radio de atracción son diferentes, pero coinciden en revelar la capacidad que tienen las líneas de transmisión para atraer rayos. Torres et al., en una revisión de ambos conceptos, confirmaron el importante efecto de la altura de las estructuras y, por lo tanto, recomiendan que este parámetro se incluya para evaluar la distancia de impacto [114].

Aunque los modelos genéricos están mejor orientados a la física del fenómeno del rayo, son los modelos electrogeométricos los que han probado su efectividad en el análisis del comportamiento de las líneas de transmisión ante las descargas eléctricas atmosféricas<sup>59</sup>. Hoy en día, los modelos genéricos no tienen uso general debido a la complejidad de los cálculos que requieren [53, 55]; las ecuaciones presentadas en el numeral 2.2.3.3 corresponden a crudas aproximaciones del LPM, por lo que, mientras se espera que estos modelos puedan ser empleados en métodos simplificados, por ahora los electrogeométricos se mantienen como herramienta principal de análisis [12, 71, 115].

### 3.2.1 Distancia de impacto al conductor

Grzybowski y sus asociados, partiendo del concepto de distancia lateral atractiva y llevando a cabo experimentos de laboratorio<sup>60</sup>, propusieron una expresión que relaciona la distancia de impacto a un conductor,  $S$ , con su altura sobre el suelo,  $h$  [63]:

$$\begin{aligned} S(I_1, h) &= S(I_1) \cdot f(h) \\ S(I_1) &= A \cdot I_1^B \\ f(h) &= h^C \end{aligned} \tag{3-12}$$

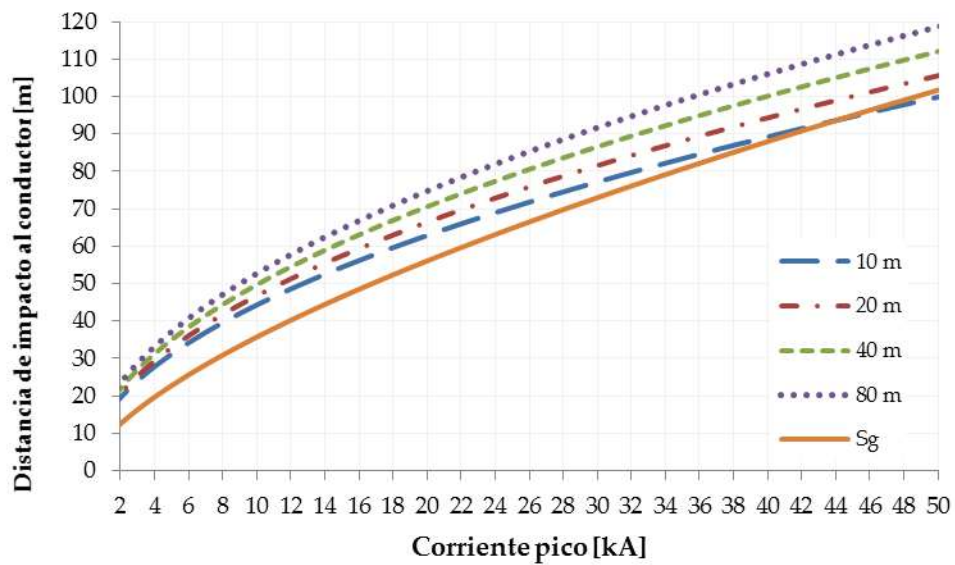
En la formulación anterior,  $S$  es la distancia de impacto al conductor y  $h$  su altura sobre el suelo,  $I_1$  es la corriente pico de la descarga y  $A$ ,  $B$  y  $C$  son constantes que

---

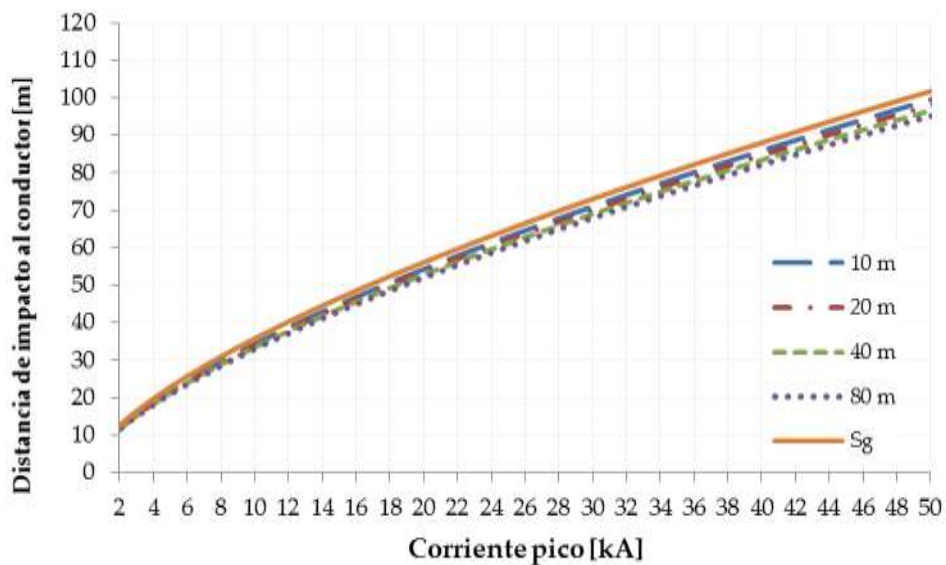
<sup>59</sup> Estos modelos funcionan muy bien en las líneas de transmisión debido a la esbeltez de los apoyos.

<sup>60</sup> Laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Estatal de Mississippi, USA.

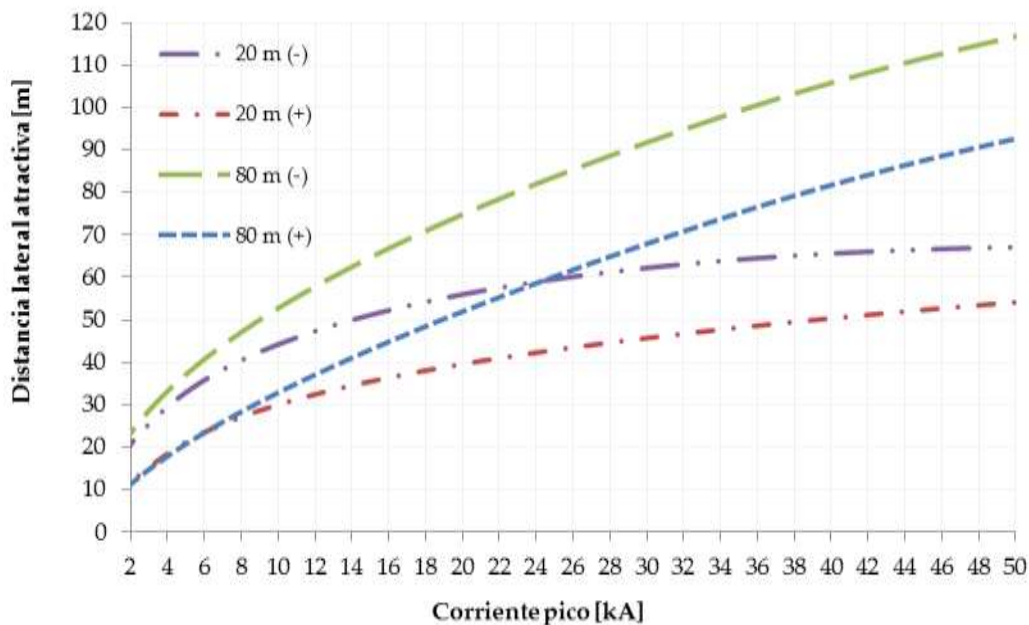
dependen de la polaridad del rayo: Para descargas negativas,  $A=11.48$ ,  $B=0.504$  y  $C=0.083$ , mientras que  $A=7.92$ ,  $B=0.66$  y  $C=-0.022$  para las positivas. Nótese que (3-12) tiene una arquitectura similar a (3-9). En las ilustraciones que siguen se muestra el comportamiento de estas distancias de impacto frente a la corriente, esto para diferentes alturas del conductor:



**Figura 3-7** Distancia de impacto según Grzybowski (rayos negativos)



**Figura 3-8** Distancia de impacto según Grzybowski (rayos positivos)



**Figura 3-9** Distancia lateral atractiva según Grzybowski (rayos negativos y positivos)

La investigación experimental de Grzybowski tuvo lugar durante el período 1998-2009. El objetivo era estudiar la incidencia de los rayos en las líneas de transmisión. En las pruebas se emplearon modelos a escala (1:100) de diferentes configuraciones de línea y se simulaban las descargas mediante impulsos eléctricos aplicados a un electrodo vertical suspendido en el aire. En general, los resultados muestran que la altura del cable de guarda, la configuración geométrica de la línea, así como la magnitud y polaridad de las descargas influyen notoriamente en el comportamiento de una línea de transmisión ante el fenómeno del rayo. Otras conclusiones para resaltar son las siguientes:

- ❖ La magnitud de la corriente pico de la descarga es el factor predominante en el valor de la distancia de impacto.
- ❖ La distancia de impacto se incrementa con la altura del conductor, esto para descargas con polaridad negativa; sin embargo, sucede lo contrario para descargas positivas, donde la distancia crítica decrece con la altura del conductor. Esto se le atribuye al efecto de la distribución del campo eléctrico alrededor del conductor, variando con la altura, por lo tanto, esto cambia el criterio requerido para el inicio del líder ascendente durante la aproximación del líder descendente.
- ❖ La distancia de impacto a un conductor es mayor que la distancia de impacto a tierra, para descargas negativas, y viceversa para descargas con polaridad

positiva. Esto incrementa el riesgo de falla de apantallamiento ya que la zona protegida por el cable de guarda se hace más pequeña para rayos positivos que para los negativos.

- ❖ La distancia lateral atractiva bajo descargas con polaridad negativa es mayor que la que se obtiene cuando se consideran descargas positivas.

El autor considera que la propuesta de Grzybowski es ventajosa con respecto a modelos similares porque ha sido concebida para el análisis de líneas de transmisión; es compatible con el modelo electrogeométrico clásico ya que maneja el concepto de distancia de impacto; considera además de la corriente pico de la descarga, su polaridad y la altura del conductor sobre el suelo.

**Nota:** Aunque está demostrado que los rayos y las descargas simuladas en laboratorio son similares en cuanto al mecanismo de rompimiento de la rigidez dieléctrica de los espacios de aire [62, 90], la extrapolación de los resultados a condiciones naturales no está del todo aceptada; ya que las condiciones de frontera son complicadas de simular y es casi imposible reproducir un canal de descarga con las mismas condiciones de temperatura y energía como las que ocurren en la naturaleza [19].

### 3.2.2 Distancia de impacto al suelo

Una ventaja evidente de los modelos electrogeométricos ante los modelos genéricos es la representación explícita que hacen del plano de tierra. Del capítulo anterior, recuérdese que la selectividad del líder descendente sobre el conductor o el terreno es diferente, por lo que Grzybowski consideró el plano de tierra en sus experimentos, pues ubicó la punta del electrodo energizado<sup>61</sup> a una determinada altura del suelo y se midió la distancia lateral atractiva para cada impulso aplicado; esto se hizo para diferentes alturas y configuraciones de línea. Lo anterior, quiere decir que la distancia de impacto a tierra, siempre permaneció constante; de hecho, la expresión empleada por el investigador se obtuvo del IEEE Std. 998 [75], donde, según (3-12),  $A=8$ ,  $B=0.65$  y  $C=0$ .

---

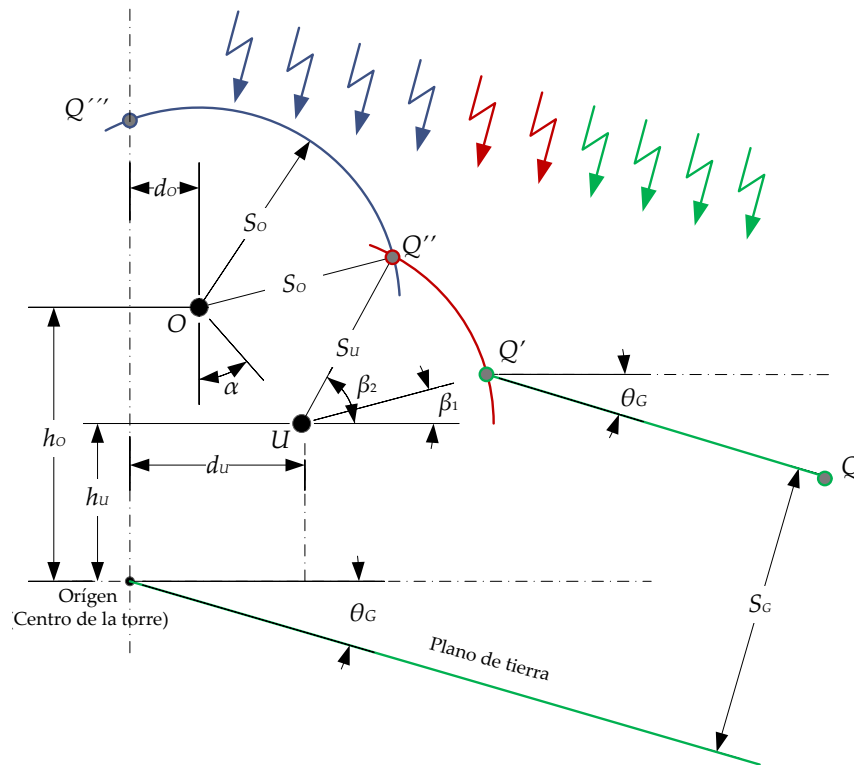
<sup>61</sup> Con este elemento simulaban la punta del líder descendente.



### 3.3 Pendiente lateral del terreno

En el corredor de una LAT que discurre por terreno montañoso, existen variaciones marcadas de los perfiles topográficos del terreno: longitudinal y transversal. Se deduce entonces que la altura de los conductores respecto del suelo también varía. Según lo expuesto hasta ahora, el análisis geométrico para la aplicación de los EGM no considera las variaciones mencionadas.

Para tener en cuenta el perfil transversal del terreno, se introduce, en el análisis geométrico, el ángulo  $\theta_G$  que representa la inclinación del plano de tierra, tal como se muestra en la [Figura 3-10](#).



**Figura 3-10** EGM esquemático considerando la inclinación lateral del terreno

En esta figura,  $U$  y  $O$  son los puntos de ubicación del conductor de fase y del cable de guarda, respectivamente; el arco circular con centro en  $O$  y radio  $S_o$ , se intersecta con el eje vertical en el punto  $Q'''$ ; el arco circular con centro en  $O$  y radio  $S_u$ , se intersecta con la recta paralela al plano de tierra en el punto  $Q'$ ;  $Q''$  es el punto de intersección de los arcos mencionados;  $\theta_G$  corresponde al ángulo de inclinación del plano de tierra, respecto del centro de la torre;  $\alpha$  es el ángulo de apantallamiento;  $h_u$  y  $h_o$  representan las alturas del conductor de fase y del cable

de guarda, las cuales, se miden desde la cota del centro de la torre; finalmente,  $d_u$  y  $d_o$  son las distancias horizontales del conductor de fase y del cable de guarda, medidas desde el eje vertical de la torre.

Los arcos  $Q'Q''$  y  $Q''Q'''$ , junto con la recta  $QQ'$ , forman una especie de “superficie de captación de rayos” a lo largo del eje radial de la línea: si el líder descendente alcanza el arco  $Q''Q'''$ , entonces hay impacto en el cable de guarda; de otra forma, si el líder alcanza el arco  $Q'Q''$ , entonces el impacto será en el conductor de fase, debido a la falla del apantallamiento, sino, entonces al alcanzar la recta  $QQ'$ , el impacto será sobre el terreno.

Con la premisa de que los ángulos  $\alpha$ ,  $\theta_G$ ,  $\beta_1$  y  $\beta_2$  son positivos cuando se miden en sentido contrario de las manecillas del reloj y negativos, en el otro sentido, se tiene que  $\beta_1$  y  $\beta_2$  se pueden calcular por medio de las expresiones que se indican a continuación:

$$\beta_1 = \begin{cases} \theta_G + \sin^{-1} \left\{ \frac{S_G - \tilde{h}_u}{S_u} \right\}, & S_G > \tilde{h}_u - S_u \cdot \sin \theta_G \\ 0, & S_G \leq \tilde{h}_u - S_u \cdot \sin \theta_G \end{cases}$$

$$\beta_2 = \alpha + \sin^{-1} \left[ \frac{t^2 + S_u^2 - S_o^2}{2 \cdot t \cdot S_u} \right] \quad (3-13)$$

$$t = \frac{h_o - h_u}{\cos \alpha}$$

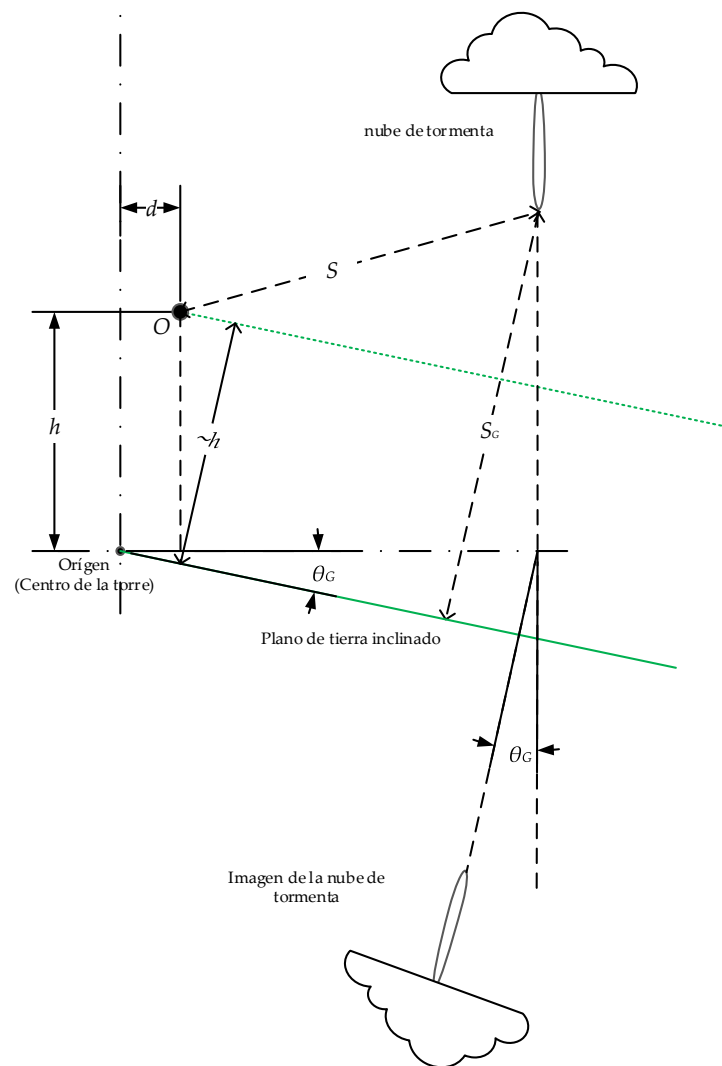
Los radios  $S_o$  y  $S_u$  corresponden a las distancias de impacto del cable de guarda y conductor de fase, respectivamente; sus valores varían con la corriente pico y polaridad de la descarga y con la altura sobre el suelo;  $S_G$  representa el valor de la distancia de impacto al terreno:

$$\begin{aligned} S_o &= A \cdot I_1^B \cdot \tilde{h}_o^C \\ S_u &= A \cdot I_1^B \cdot \tilde{h}_u^C \\ S_G &= 8 \cdot I_1^{0.65} \end{aligned} \quad (3-14)$$

En este punto es muy importante tener en cuenta que si el plano de tierra presenta una inclinación lateral,  $\theta_G$ , entonces la altura de los cables variará conforme la siguiente expresión:

$$\begin{aligned}\tilde{h}_O &= h_O \cdot \cos \theta_G - d_O \cdot \sin \theta_G \\ \tilde{h}_U &= h_U \cdot \cos \theta_G - d_U \cdot \sin \theta_G\end{aligned}\tag{3-15}$$

Como se ilustra en la [Figura 3-11](#), esta modificación se basa en que la imagen de la punta del líder descendente se desvía de la vertical  $\theta_G$  grados [\[116\]](#).



**Figura 3-11.** Líder descendente en un terreno inclinado

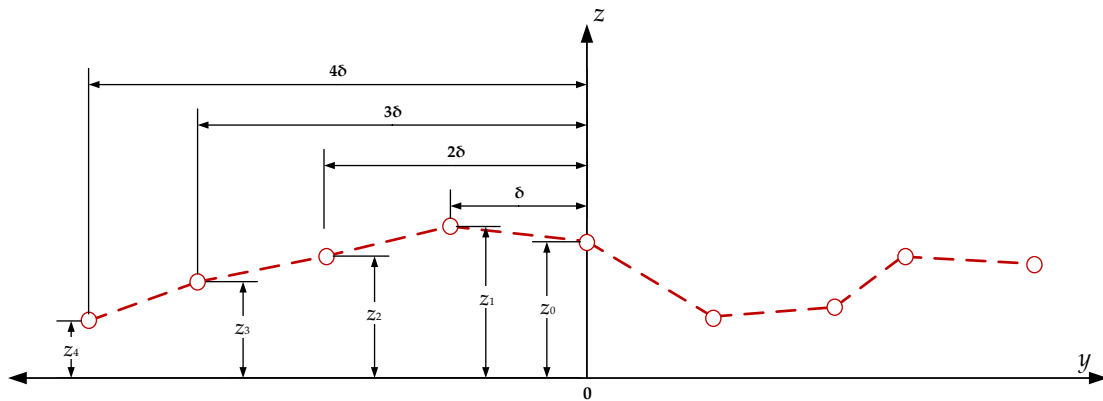
Al tener en cuenta que a lo ancho del corredor de una línea de transmisión, las cotas del terreno presentan variaciones y que, según la [Figura 3-11](#), se requiere de un valor único del ángulo  $\theta_G$  para una franja determinada, se propone obtener una oblicuidad promedio del terreno empleando la siguiente aproximación:

$$\theta_G = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \theta_i$$

con (3-16)

$$\theta_i = \tan^{-1} \left( \frac{z_i - z_{i-1}}{\delta} \right)$$

Como se ilustra en la [Figura 3-12](#), la franja del corredor de la línea, a ambos lados del eje, se divide en  $n$  segmentos cuya longitud viene dada por  $\delta$ ; por lo que se tienen  $n+1$  puntos de terreno, a los cuales se les deben obtener las respectivas cotas,  $z_i$ .



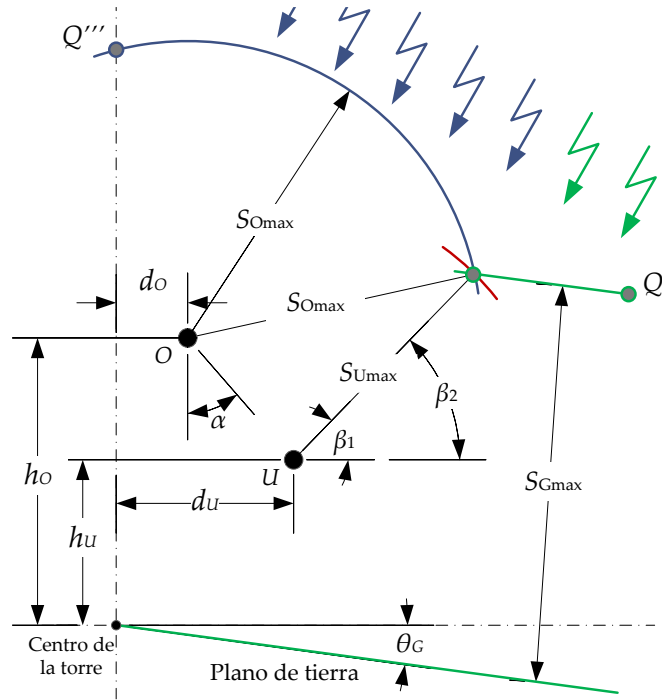
**Figura 3-12.** Diagrama esquemático para calcular la inclinación lateral del terreno

Nótese que la ecuación (3-16) consiste en un promedio de las oblicuidades laterales de los segmentos en los que se ha dividido la franja lateral del apoyo.

El intervalo  $\delta$  corresponde a una longitud fija que puede ajustarse de acuerdo con los recursos computacionales que se tengan disponibles. A mayor valor de  $n$  (entero), mayor precisión se tendrá para la oblicuidad lateral del terreno.

### 3.4 Corriente máxima de falla de apantallamiento

La corriente máxima de falla del apantallamiento,  $I_{\max}$ , es aquel valor de corriente pico que hace que, geoméricamente, se cierre totalmente el arco expuesto. La [Figura 3-13](#) ilustra tal situación. La diferencia  $\beta_2 - \beta_1$  constituye el ángulo central del arco expuesto  $Q'Q''$ , por lo tanto, si se quiere calcular la corriente máxima de falla de apantallamiento,  $I_{\max}$ , hay que hacer que  $\beta_2 - \beta_1 = 0$ .



**Figura 3-13** Buscando el valor de  $I_{\max}$

Para hallar  $I_{\max}$  a partir de (3-13) es necesario emplear métodos numéricos o, en su defecto, un paquete informático especializado en matemáticas. No obstante, cuando se hacen simplificaciones como emplear EGMs donde  $S_o = S_u$  (aquellos cuyas distancias críticas no dependen de la altura del conductor), entonces se puede obtener una fórmula que permite el cálculo directo de  $I_{\max}$  (3-17).

$$I_{\max} = \left( \frac{S_{G\max}}{A} \right)^{\frac{1}{B}} \quad (3-17)$$

$$S_{G\max} = \frac{-G - \sqrt{G^2 + 4 \cdot F \cdot H}}{2 \cdot F}$$

En las expresiones anteriores:

$$F = 4 \left[ \gamma^2 - \frac{1}{\sin^2(\alpha - \theta_G)} \right]$$

$$H = \frac{G}{4(4\gamma^2 - F)} + t^2 \quad (3-18)$$

$$G = \left( \frac{4\gamma^2 - F}{\cos \alpha} \right) \left[ h_o \cdot \cos(\theta_G + \alpha) + h_u \cdot \cos(\theta_G - \alpha) - 2d_o \cdot \sin \theta_G \cdot \cos \alpha \right]$$

### 3.5 Ángulo de aproximación del rayo

Una característica evidente de los rayos es la tortuosidad, por lo cual, no es realista suponer que el líder descendente se desarrolla a través de un canal vertical. En la formulación del EGM de Young (1963), se consideraron sólo descargas verticales. Más tarde, Brown & Whitehead (1969), desarrollaron el concepto de aproximación no perpendicular del líder descendente y propusieron una función de densidad de probabilidad que se relaciona con el ángulo de incidencia del rayo [39]:

$$g(\psi) = \begin{cases} 0, & \psi < \frac{\pi}{2} \\ K_m \cos^m \psi, & -\frac{\pi}{2} \leq \psi \leq \frac{\pi}{2} \\ 0, & \psi > \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (3-19)$$

donde,  $\Psi$  es el ángulo de desviación con respecto a la dirección vertical y  $m$  es un exponente que debe ser escogido por el diseñador. La función de densidad de probabilidad  $g(\Psi)$  debe cumplir con la siguiente propiedad:

$$\int_{-\frac{\pi}{2}}^{+\frac{\pi}{2}} K_m \cos^m \psi \cdot d\psi = 1 \quad (3-20)$$

Luego, el coeficiente  $K_m$  puede calcularse mediante la expresión que sigue:

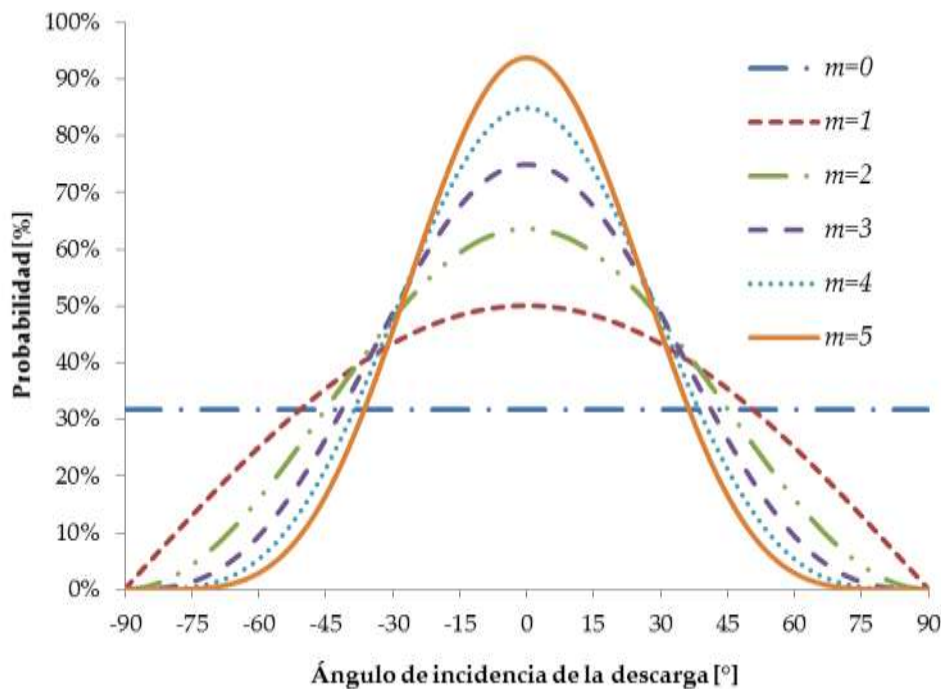
$$K_m = \frac{1}{\int_{-\frac{\pi}{2}}^{+\frac{\pi}{2}} \cos^m \psi \cdot d\psi} \quad (3-21)$$

Nótese que para  $m=0$ , la curva se asemeja a una distribución uniforme; mientras que para  $m>2$ , la tendencia es a una distribución Gaussiana. A continuación, se indican algunos valores  $K_m$ , en función del valor seleccionado para  $m$ :

**Tabla 3-4** Parámetros de la distribución del ángulo de incidencia de la descarga

$m$	0	1	2	3	4	5
$K_m$	$\frac{1}{p}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{2}{p}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{8}{3p}$	$\frac{15}{16}$

En la [Figura 3-14](#) se muestran diferentes curvas de la distribución del ángulo de la descarga, cada una está asociada a un valor específico de  $m$ .

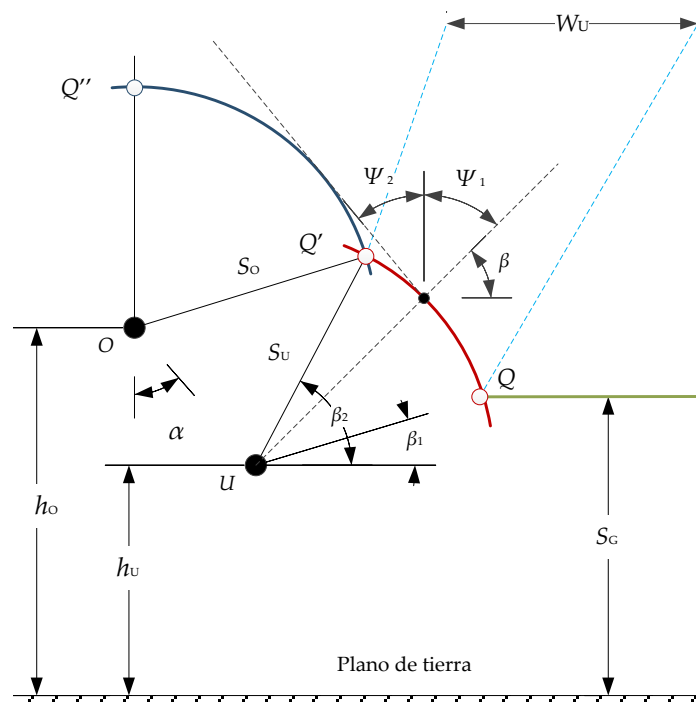


**Figura 3-14** Densidad de probabilidad del ángulo de incidencia de la descarga

Cuando  $m=0$ , se trata de un caso particular en el que todos los ángulos de aproximación del rayo tienen igual probabilidad de ocurrencia y, por lo tanto, no se puede despreciar la posibilidad de que se presenten descargas horizontales a la línea ( $\Psi = \pm\pi/2$ ). Por otro lado, el uso de un exponente muy grande,  $m \rightarrow \infty$ , implica que se asumen sólo descargas verticales ( $\Psi = 0$ ). En general,  $m$  es un exponente que se debe escoger cuidadosamente, preferiblemente con base en resultados derivados

de observaciones de campo. Mientras que  $m=2$  aplica para descargas en épocas de invierno,  $m=3$  parece ser razonable para descargas en época de verano [117].

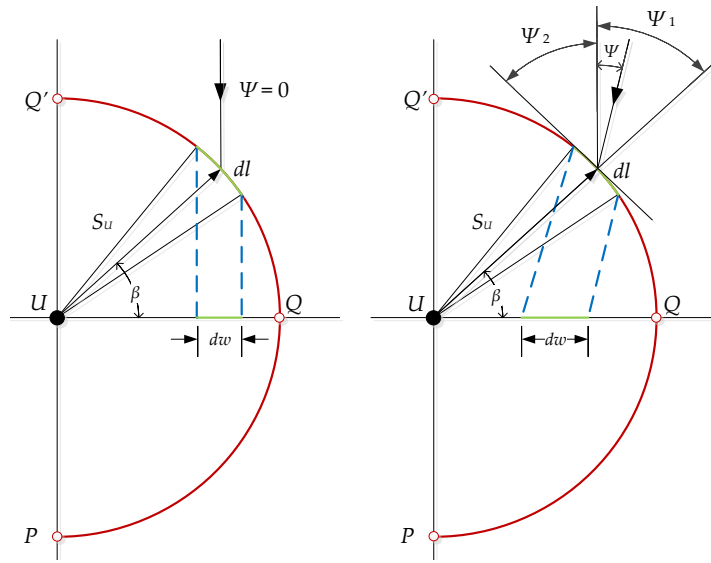
Con relación al análisis geométrico hecho para la aplicación de los EGM, en la Figura 2-19, el ancho  $W_u$  equivale a la proyección horizontal del arco  $QQ'$ ; lo cual, es válido sólo para descargas verticales. En cambio, en la Figura 3-15 se muestra el análisis hecho para un líder descendente que se aproxima con un ángulo que varía desde  $\Psi_2$  hasta  $\Psi_1$ . Además, se tiene que los ángulos  $\beta_1$  y  $\beta_2$  definen la longitud del arco  $QQ'$  y vienen dados por (3-13). Nótese que, en referencia a la figura,  $\theta_c=0$ , ya que se trata de terreno plano.



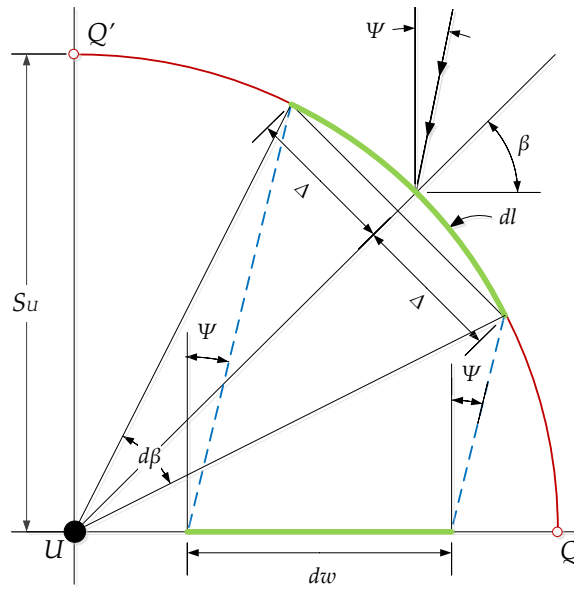
**Figura 3-15** Análisis geométrico del EGM considerando el ángulo de la descarga

En las figuras que siguen, se muestra el mismo análisis, pero según los criterios de Chang & Yuan [6]. Se tiene que, de conformidad con el principio de proyección, cuando el líder descendente entra de forma vertical ( $\Psi = 0$ ) solamente el arco  $QQ'$  ( $\beta \geq 0$ ) se proyecta sobre la recta  $UQ$ ; mientras que el arco  $QP$  ( $\beta < 0$ ) no lo hace, puesto que se encuentra protegido por el arco superior,  $QQ'$ . En la Figura 3-17 se considera que el diferencial de arco,  $dl$ , tiene un ángulo de barrido,  $\beta$ . Luego, si  $\beta \geq 0$ , entonces  $dl$  tendrá proyección en  $UQ$ , por lo tanto puede decirse que aun cuando se consideren descargas no verticales, solamente la parte superior del arco dibujado por la distancia crítica  $S_u$ , tendrá un efecto atractivo sobre los rayos.





**Figura 3-16** Análisis geométrico de la protección del arco superior sobre el arco inferior



**Figura 3-17** Análisis del EGM considerando el ángulo de la descarga

De las ilustraciones anteriores, se han deducido las expresiones para calcular el diferencial de ancho,  $dx$ , y el diferencial de arco,  $dl$ :

$$dx = \frac{\Delta \times \sin(\beta + \psi) \times \sqrt{4S^2 - \Delta^2}}{S_u \times \cos \psi} \quad (3-22)$$

$$dl = S \times d\delta$$

Si se selecciona un  $dl$  muy pequeño, entonces se tiene que:

$$\begin{aligned} 4S^2 &\approx \Delta^2 \\ dl &\approx 2\Delta \end{aligned} \quad (3-23)$$

por lo tanto, la ecuación (3-22) puede describirse así:

$$dx = S_u \times \frac{\sin(\beta + \psi)}{\cos \psi} d\beta \quad (3-24)$$

Debido a que el líder descendente se aproxima a la línea en dirección aleatoria, es necesario tener en cuenta la función de densidad de probabilidad del ángulo de incidencia del rayo,  $g(\psi)$  (3-19). Luego, el ancho expuesto,  $W_u$ , se puede calcular mediante la siguiente expresión:

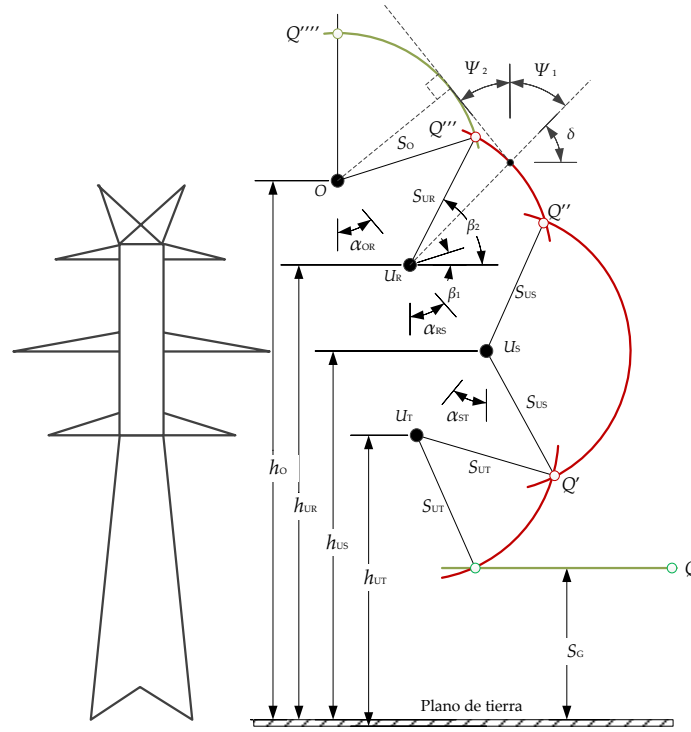
$$W_u = \int_{\beta_1}^{\beta_2} \int_{\Psi_2(\beta)}^{\Psi_1(\beta)} S_u \times \frac{\sin(\beta + \psi)}{\cos \psi} g(\psi) d\psi d\beta \quad (3-25)$$

Los límites de integración tienen en cuenta la influencia de conductores adyacentes y plano de tierra.

Las expresiones para  $\Psi_1$  y  $\Psi_2$  son las que se indican a continuación:

$$\begin{aligned} \Psi_1(\beta) &= \frac{\pi}{2} - \beta \\ \Psi_2(\beta) &= \tan^{-1} \left( \frac{p \cdot \sqrt{p^2 + q^2 - S_o^2} + q \cdot S_o}{q \cdot \sqrt{p^2 + q^2 - S_o^2} - p \cdot S_o} \right) \\ p(\beta) &= S_u \cdot \cos \beta + (h_o - h_u) \cdot \tan \alpha \\ q(\beta) &= S_u \cdot \sin \beta - (h_o - h_u) \end{aligned} \quad (3-26)$$

$\Psi_2$  tiene en cuenta el efecto de blindaje del cable de guarda sobre el conductor de fases, por lo que está definido como el ángulo entre la tangente que va desde el centro de  $dl$  hasta el arco  $Q'Q''$  y la vertical que pasa por el centro de  $dl$ , tal como se muestra en la [Figura 3-18](#), donde el ángulo  $\Psi_2$  tiene en cuenta el efecto protector del conductor superior (ubicado por encima).



**Figura 3-18** Ángulo de incidencia del rayo – Torre para doble circuito

En general, las expresiones para calcular los límites de integración de la ecuación (3-25) dependen de la disposición de los conductores en la estructura (torre o poste), por lo que, para cada configuración se deben obtener las ecuaciones para los ángulos  $\beta_1$  y  $\psi_2$ , por ejemplo, para la línea de la Figura 3-18, el ángulo  $\beta_1$  considera el efecto del conductor inferior y no está relacionada con el plano de tierra, por lo que su valor se calculará con una fórmula diferente a (3-13) y se utilizará la expresión (3-27).

$$\beta_1 = \alpha_{RS} + \sin^{-1} \frac{S_0^2 + S_{US}^2 - S_{UR}^2}{2 \times S_{US} \times S_0} \quad (3-27)$$

$$t = \frac{h_{UR} - h_{US}}{\cos \alpha_{RS}}$$

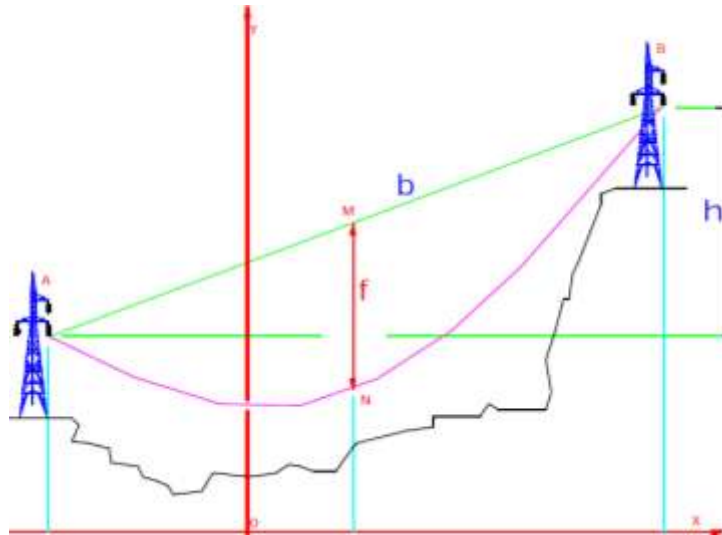
#### Notas

- Los ángulos  $\alpha$ ,  $\beta_1$  y  $\beta_2$  se consideran positivos cuando se miden en sentido contrario a las manecillas del reloj. Lo contrario sucede para los ángulos  $\psi_1$  y  $\psi_2$ .
- Para una corriente del rayo específica, las distancias de impacto,  $S_0$  y  $S_u$ , se comportan como constantes, ya que no dependen del ángulo  $\beta$ .

- iii. Cuando la ordenada del punto  $U$  es menor que  $h_0$ ,  $\beta_1$  resulta con valor negativo; pero, como sólo la parte superior del arco  $QQ'$  tendrá un efecto atractivo sobre el rayo, entonces se establece que  $\beta_1=0^\circ$  para este caso.
- iv. La ecuación (3-25) se puede resolver empleando métodos numéricos o mediante la programación de un paquete informático especializado en matemáticas.

### 3.6 Flecha del conductor y perfil longitudinal del terreno

Como se ha expuesto hasta ahora, la falla de apantallamiento está relacionada con el ángulo de protección y la altura del conductor de fase sobre el plano de tierra. Los EGM clásicos han evolucionado desde los modelos simplificados [38, 39] hasta los de mayor complejidad [63, 94], siendo éstos últimos los que indican explícitamente la selectividad del rayo respecto del elemento a impactar dentro de la línea, ya que muestran claras diferencias entre las distancias críticas para el conductor de fases, el cable de guarda y el suelo. Esto revela que, además de la posición relativa entre el cable de guarda y el conductor de fase, cobra importancia la posición de cada uno de éstos con respecto al terreno. A pesar de este hecho, hoy en día, cuando se realizan los cálculos sólo se toman las alturas promedio del conductor y cable de guarda [12, 71], lo que no es práctico para líneas donde se tengan vanos largos y desnivelados.

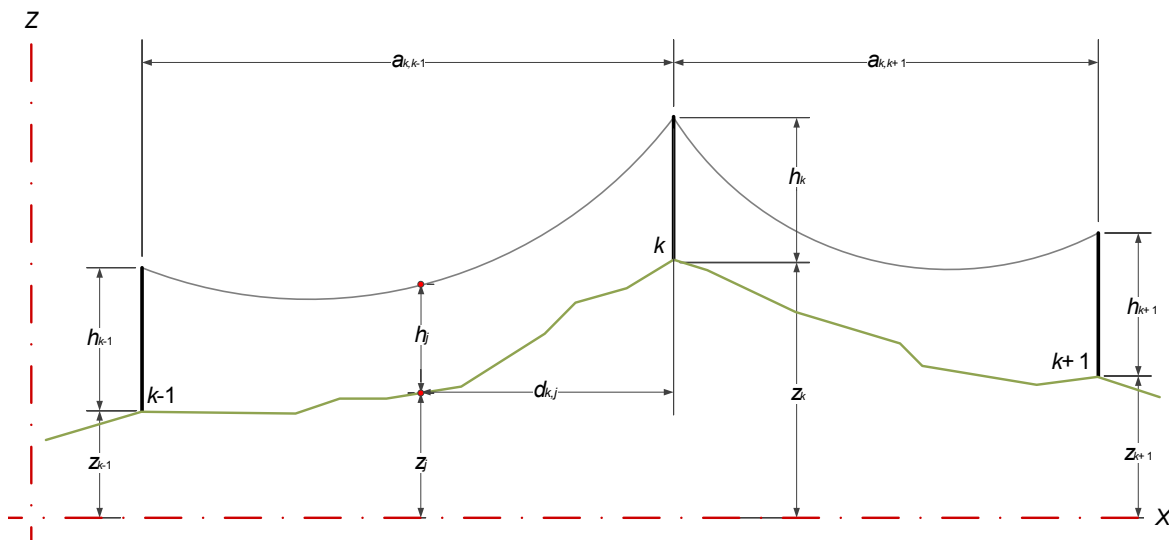


**Figura 3-19** Ubicación de la flecha para un vano largo y desnivelado

Tal como se muestra en la [Figura 3-19 \[118\]](#), en los vanos largos con desniveles significativos, la flecha del conductor resulta superior a la altura de su punto de sujeción. Esto es muy común en líneas de transmisión que discurren por terreno montañoso. Por lo tanto, si se emplea la ecuación (2-48) para calcular la altura promedio del conductor sobre el suelo, el resultado será un valor negativo, lo cual no tiene significado físico en los EGM.

En el corredor de una línea de transmisión, la altura de los conductores respecto del suelo se ve afectada por la catenaria - que forma el conductor a lo largo del vano - y por la variación de cotas de los puntos de terreno que conforman el perfil topográfico longitudinal.

Los efectos de la catenaria y de la variación de cotas de terreno a lo largo del perfil longitudinal se pueden analizar mediante la [Figura 3-20](#), donde la posición de cada apoyo de la línea queda definida por sus coordenadas en un sistema ortogonal a derechas, XYZ. En la figura, las letras  $x$ ,  $z$  y  $h$  se usan para representar abscisas, cotas de terreno y alturas de amarre del conductor, respectivamente; los subíndices  $k-1$  y  $k+1$  corresponden a los apoyos anterior y posterior al apoyo bajo estudio,  $k$ .



**Figura 3-20** Cálculo de las alturas del conductor en cualquier punto del vano

Si se define la ubicación de las bases de los apoyos  $k-1$ ,  $k$  y  $k+1$  por los puntos coordenados  $(x_{k-1}, y_{k-1}, z_{k-1})$ ,  $(x_k, y_k, z_k)$  y  $(x_{k+1}, y_{k+1}, z_{k+1})$ , respectivamente, entonces la separación entre dos puntos de amarre consecutivos vienen dadas por (3-28) las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned}
L_{k,k-1} &= \sqrt{(x_k - x_{k-1})^2 + (y_k - y_{k-1})^2 + [(z_k + h_k) - (z_{k-1} + h_{k-1})]^2} \\
L_{k+1,k} &= \sqrt{(x_{k+1} - x_k)^2 + (y_{k+1} - y_k)^2 + [(z_{k+1} + h_{k+1}) - (z_k + h_k)]^2}
\end{aligned}
\tag{3-28}$$

Por conveniencia, se define el vano como la proyección horizontal de dicha separación y el desnivel como su proyección vertical. Por lo tanto, los vanos adyacentes al apoyo  $k$ , se pueden calcular así:

$$\begin{aligned}
a_{k,k-1} &= \sqrt{(x_k - x_{k-1})^2 + (y_k - y_{k-1})^2} \\
a_{k+1,k} &= \sqrt{(x_{k+1} - x_k)^2 + (y_{k+1} - y_k)^2}
\end{aligned}
\tag{3-29}$$

y los desniveles asociados a estos vanos, como sigue:

$$\begin{aligned}
b_{k,k-1} &= (z_k + h_k) - (z_{k-1} + h_{k-1}) \\
b_{k+1,k} &= (z_{k+1} + h_{k+1}) - (z_k + h_k)
\end{aligned}
\tag{3-30}$$

Al hacer el análisis de alguno de los vanos adyacentes al apoyo  $k$ , cualquier punto de terreno,  $j$ , tendrá una distancia vertical al conductor,  $h_j$  [m], que se puede calcular por medio de la siguiente fórmula:

$$\begin{aligned}
h_j(u_j) &= \begin{cases} h_{k-1} + q_j; & \text{si se analiza el vano } a_{k,k-1} \\ h_k + q_j; & \text{si se analiza el vano } a_{k+1,k} \end{cases} \\
q_j(u_j) &= C \cdot \left[ \cosh\left(\frac{u_j - u_0}{C}\right) - \cosh\left(\frac{u_0}{C}\right) \right] \\
u_j(d_{k,j}) &= \begin{cases} a - d_{k,j}; & \text{si } b \geq 0 \\ d_{k,j}; & \text{si } b < 0 \end{cases} \\
u_0 &= \frac{a}{2} + C \cdot \sinh^{-1} \left[ \frac{b \cdot \sqrt{e^{\frac{a}{C}}}}{C \cdot \left(1 - e^{\frac{a}{C}}\right)} \right]
\end{aligned}
\tag{3-31}$$

En las expresiones anteriores,  $C$  [m] es el parámetro de la catenaria y  $u_0$  [m] es la abscisa de su vértice, la cual, está referida a un sistema local de coordenadas cuyo origen es el punto de amarre anterior al vano bajo análisis; es decir, al punto  $(x_{k-1}, y_{k-1}, z_{k-1}+h_{k-1})$  si se estudia el vano  $a_{k,k-1}$  o al punto  $(x_k, y_k, z_k+h_k)$  si el vano bajo estudio es  $a_{k+1,k}$ ;  $d_{k,j}$  es la distancia horizontal a  $j$  (medida desde la base del apoyo  $k$ ) y  $z_j$  su cota. Los valores de  $a$  y  $b$  dependen del vano que se esté analizando: El desnivel  $b_{k,k-1}$  está asociado al vano  $a_{k,k-1}$  y  $b_{k+1,k}$  al vano  $a_{k+1,k}$ , respectivamente.

Para obtener la cota de un punto de terreno cualquiera,  $z_j$ , es necesario conocer primero las coordenadas que definen su posición dentro del corredor de la línea de transmisión. Si el punto  $j$  está localizado entre los apoyos  $k-1$  y  $k$ , entonces sus coordenadas en XY se pueden calcular por medio de (3-32); mientras que, si el punto  $j$  se encuentra entre los apoyos  $k$  y  $k+1$ , entonces sus coordenadas se pueden calcular mediante (3-33).

$$\begin{aligned} x_j &= x_k - d_{k,j} \cdot \cos \varphi_{k,k-1} \\ y_j &= \begin{cases} y_k - d_{k,j} \cdot \sin \varphi_{k,k-1}; & \text{si } y_k \geq y_{k-1} \\ y_k + d_{k,j} \cdot \sin \varphi_{k,k-1}; & \text{si } y_k < y_{k-1} \end{cases} \end{aligned} \quad (3-32)$$

$$\varphi_{k,k-1} = \cos^{-1} \left( \frac{x_k - x_{k-1}}{a_{k,k-1}} \right)$$

$$\begin{aligned} x_j &= x_k + d_{j,k} \cdot \cos \varphi_{k+1,k} \\ y_j &= \begin{cases} y_k - d_{j,k} \cdot \sin \varphi_{k+1,k}; & \text{si } y_k \geq y_{k+1} \\ y_k + d_{j,k} \cdot \sin \varphi_{k+1,k}; & \text{si } y_k < y_{k+1} \end{cases} \end{aligned} \quad (3-33)$$

$$\varphi_{k+1,k} = \cos^{-1} \left( \frac{x_{k+1} - x_k}{a_{k+1,k}} \right)$$

Ahora, si cada vano adyacente al apoyo  $k$  se fracciona en un número par de segmentos, entonces la longitud de cada segmento puede calcularse por medio de las siguientes expresiones:

$$\delta_{k+1,k} = \frac{a_{k+1,k}}{2 \cdot \min \left\{ M \in \mathbb{N}^+ \mid \frac{a_{k+1,k}}{2 \cdot \delta_0} \leq M \right\}} \quad (3-34)$$

$$\delta_{k,k-1} = \frac{a_{k,k-1}}{2 \cdot \min \left\{ N \in \mathbb{N}^+ \mid \frac{a_{k,k-1}}{2 \cdot \delta_0} \leq N \right\}} \quad (3-35)$$

donde,  $\delta_0$  es la longitud inicial propuesta para cada segmento. Se sugiere  $\delta_0 = 1$  m. Nótese que el vano  $a_{k,k-1}$  se ha dividido en  $2N$  segmentos, cada uno con una longitud ajustada,  $\delta_{k,k-1}$ , y el vano  $a_{k+1,k}$  se ha dividido en  $2M$  segmentos, cada uno con una longitud ajustada,  $\delta_{k+1,k}$ . Luego, para estos vanos adyacentes a  $k$ , las distancias horizontales a  $j$  (medidas desde la base de  $k$ ) son,  $d_{k,j}$  (3-36) y  $d_{j,k}$  (3-37), respectivamente.

$$d_{k,j} = j \cdot \delta_{k,k-1} \quad \text{con } j = 0, 1, 2, \dots, N \quad (3-36)$$

$$d_{j,k} = j \cdot \delta_{k+1,k} \quad \text{con } j = 0, 1, 2, \dots, M \quad (3-37)$$

Si se pretende obtener el valor de la *SFFOR* asociada al apoyo  $k$ , y calculada para cada conductor, se puede proceder así:

$$\begin{aligned} SFFOR_k &= SFFOR_{k,k-1} + SFFOR_{k+1,k} \\ SFFOR_{k,k-1} &= \frac{GFD}{1000} \cdot \delta_{k,k-1} \cdot \sum_{j=0}^N (T_0 + T_N + T_j) \\ SFFOR_{k+1,k} &= \frac{GFD}{1000} \cdot \delta_{k+1,k} \cdot \sum_{j=0}^M (T_0 + T_M + T_j) \end{aligned} \quad (3-38)$$



Para un punto  $j$  sobre el perfil de terreno entre las bases de los apoyos  $k-1$  y  $k$ , los valores de  $T_0$ ,  $T_N$  y  $T_j$  son los que se muestran a continuación:

$$\begin{aligned} T_0 &= \frac{1}{2} \cdot \int_{I_{\text{crit}}}^{I_{\text{max}}(\theta_G)} W_U(h_0) \cdot f_1(I) \cdot dI \quad (j=0) \\ T_N &= \frac{1}{2} \cdot \int_{I_{\text{crit}}}^{I_{\text{max}}(\theta_G)} W_U(h_N) \cdot f_1(I) \cdot dI \quad (j=N) \\ T_j &= \sum_{j=1}^{N-1} \int_{I_{\text{crit}}}^{I_{\text{max}}(\theta_G)} W_U(h_j) \cdot f_1(I) \cdot dI; \quad j=1,2,\dots,N-1 \end{aligned} \quad (3-39)$$

Para un punto  $j$  sobre el perfil de terreno entre las bases de los apoyos  $k$  y  $k+1$ , los valores de  $T_0$ ,  $T_M$  y  $T_j$  son los que siguen:

$$\begin{aligned} T_0 &= \frac{1}{2} \cdot \int_{I_{\text{crit}}}^{I_{\text{max}}(\theta_G)} W_U(h_0) \cdot f_1(I) \cdot dI \quad (j=0) \\ T_M &= \frac{1}{2} \cdot \int_{I_{\text{crit}}}^{I_{\text{max}}(\theta_G)} W_U(h_M) \cdot f_1(I) \cdot dI \quad (j=M) \\ T_j &= \sum_{j=1}^{M-1} \int_{I_{\text{crit}}}^{I_{\text{max}}(\theta_G)} W_U(h_j) \cdot f_1(I) \cdot dI; \quad j=1,2,\dots,M-1 \end{aligned} \quad (3-40)$$

siendo,  $W_U$  [m] el ancho expuesto del conductor de fase bajo análisis y  $f_1(I)$  la función de densidad de probabilidad de la corriente pico del rayo.

Finalmente, el corredor de la línea se divide en  $T$  tramos longitudinales, cada uno asociado con un apoyo. El área de influencia de cada apoyo comprende la suma de las áreas asociadas a cada semivano adyacente. Por lo tanto, la tasa total de flameos de la línea por fallas de apantallamiento, **SFFOR**, se puede calcular a partir del aporte que hace cada torre, **SFFOR<sub>k</sub>**, empleando la siguiente expresión:

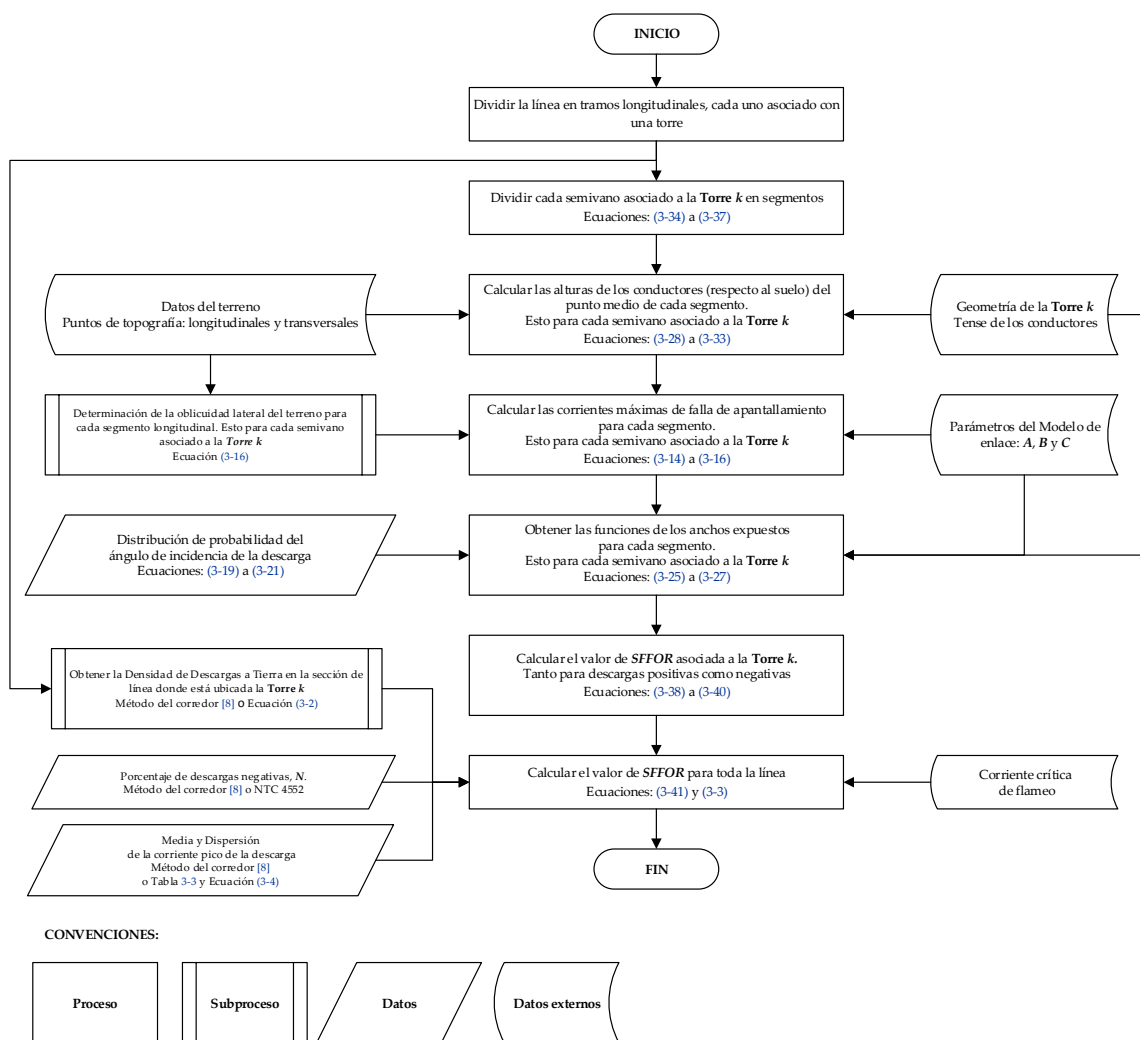
$$SFFOR = \sum_{k=1}^T SFFOR_k \quad (3-41)$$

donde  $T$  corresponde a la cantidad total de apoyos de la línea.

### 3.7 Diagrama de flujo

A través de lo expuesto en los apartados anteriores se ha descrito un método para calcular el valor de *SFFOR* para líneas aéreas de transmisión que discurren por zonas de topografía montañosa, considerando la polaridad, multiplicidad y ángulo de aproximación de los rayos.

El método propuesto puede resumirse de manera gráfica por medio del diagrama de flujo que aparece a continuación:



**Figura 3-21.** Diagrama de flujo para calcular la *SFFOR* de acuerdo con el método propuesto

### 3.8 Conclusiones

Estudios experimentales recientes han corroborado que la distancia de impacto a tierra es diferente de la distancia de impacto a un conductor horizontal suspendido sobre el suelo; también, que la altura del conductor sobre el suelo incrementa el valor de la distancia de impacto, pero sólo para descargas con polaridad negativa; puesto que para los rayos positivos sucede lo contrario [62, 63, 93-95, 119-121]. Por consiguiente, considerando la distancia de impacto al terreno como invariante ante la polaridad de la descarga, se deduce que este hecho incrementa el riesgo de falla de apantallamiento al hacer más pequeña la zona protegida por el cable de guarda cuando inciden los rayos positivos. Esto sugiere que la polaridad de la descarga es un factor clave para determinar el ángulo de apantallamiento efectivo de una línea de transmisión; sin embargo, debe haber un balance entre este hecho y la probabilidad de ocurrencia de los rayos positivos.

Después de estudiar los diversos modelos de enlace, se encontró que las ecuaciones de Grzybowski & Disyadej [63] resultan útiles a la hora de analizar, a través del método electrogeométrico, la falla de apantallamiento en líneas de transmisión, considerando la influencia de la altura de cada conductor sobre el suelo y la polaridad de la descarga. Es de resaltar que, a diferencia de otras ecuaciones para la distancia de impacto, éstas consideran explícitamente la altura del conductor en su arquitectura, pero sin ser muy sensibles a este factor como las desarrolladas por Eriksson [46] y Rizk [47] que, si bien corresponden a radios atractivos<sup>62</sup>, han sido empleadas por varios autores [7, 122-124] como distancias de impacto para tratar de llenar este “vacío” en el método electrogeométrico<sup>63</sup>. Esto es de particular interés cuando se estudian los corredores de líneas en regiones montañosas donde las distancias de conductores al suelo (a medio vano) pueden ser superiores a la altura misma de la torre y donde el porcentaje de ocurrencia de rayos positivos puede no ser despreciable.

Es precisamente en las regiones montañosas, tales como la Andina, donde la altura del conductor sobre el suelo varía con la topografía del terreno, tanto transversal como longitudinalmente. Por ello, en este capítulo se presentaron fórmulas para

---

<sup>62</sup> Recuérdese que se trata de un concepto físico diferente al de distancia o radio de impacto.

<sup>63</sup> Recuérdese que, exceptuando el modelo de Young, ninguna versión del EGM relaciona la distancia de impacto al conductor con su altura sobre el terreno. Esta dependencia es aparentemente considerada a través del factor  $\gamma$  por algunas versiones solamente.

evaluar la posición relativa de los conductores y cables de guarda respecto de la cota del suelo, también expresiones que permiten determinar la corriente máxima de falla de apantallamiento y la tasa de salidas de la línea<sup>64</sup>. Además, en el análisis, se ha tenido en cuenta la probabilidad de ocurrencia de rayos no verticales<sup>65</sup>, lo que hace de esta propuesta un método electrogeométrico mejorado con respecto a los procedimientos tradicionales que, debido a sus aproximaciones, podrían no ser adecuados para el análisis de la falla de apantallamiento en zonas de topografía montañosa.

---

<sup>64</sup> Estas expresiones están dispuestas de forma general, así que pueden emplearse con cualquiera de las versiones del modelo electrogeométrico.

<sup>65</sup> El modelo del ángulo de incidencia de la descarga, expuesto en este documento es en realidad una cruda aproximación del comportamiento real de los rayos. Por lo que, las conclusiones derivadas de este trabajo de investigación deberían ser usadas con prudencia.

## 4

# RESULTADOS Y ANÁLISIS

---

Durante el período 2009-2012, Mikropoulos & Tsovilis presentaron varios trabajos donde se comparan los resultados de aplicar los diversos modelos de enlace al análisis de falla de apantallamiento en líneas de transmisión del sistema interconectado griego; sin embargo, sus resultados sólo están referidos a descargas verticales negativas en terreno plano [16, 69, 91, 125, 126]. Es por esto que en el presente capítulo se muestra un análisis similar, pero teniendo en cuenta los efectos del terreno quebrado, descargas oblicuas, rayos positivos y descargas subsecuentes. Esto, a partir de la formulación presentada en el capítulo anterior.

En vez de comparar todos los modelos, se ha hecho una selección de propuestas consideradas como representativas, a saber: Brown & Whitehead – 1969 (EGM clásicos), Rizk – 1990 (GM), IEEE Std. 1243 – 1997 (Estándar internacional), Vargas & Torres – 2006 y Grzybowski & Disyadej - 2010 (Aportes recientes). Por ser estándar, el modelo de IEEE goza de amplia aceptación para aplicaciones en ingeniería; la propuesta de Vargas & Torres está concebida bajo la física del rayo pues considera la tortuosidad y, también, se trata de la ecuación desarrollada en Colombia, adoptada y aprobada en la Norma ICONTEC 4552-2008 [89]. El modelo de Brown & Whitehead es famoso por ser el primero en proponer una distribución estadística para el ángulo de aproximación de la descarga (en Japón se ha adoptado su uso para evaluar la SFFOR de líneas UAT [127]). La formulación de Rizk ha sido empleada por varios autores como punto de partida para investigar acerca de la incidencia de rayos en líneas EAT y UAT [116, 128, 129]; al mismo tiempo, prestigiosas guías de diseño recomiendan su uso en vez de las ecuaciones estandarizadas [130, 131]. Finalmente, el enfoque de Grzybowski & Disyadej tiene la ventaja de incluir explícitamente la dependencia del radio de impacto (*striking distance*) con la altura del conductor<sup>66</sup>, esto para ambas polaridades de descarga.

Para una configuración de torre determinada, se muestran los resultados de aplicar el análisis geométrico de la falla de apantallamiento empleando los modelos de enlace mencionados. Los parámetros estudiados incluyen: corriente máxima de

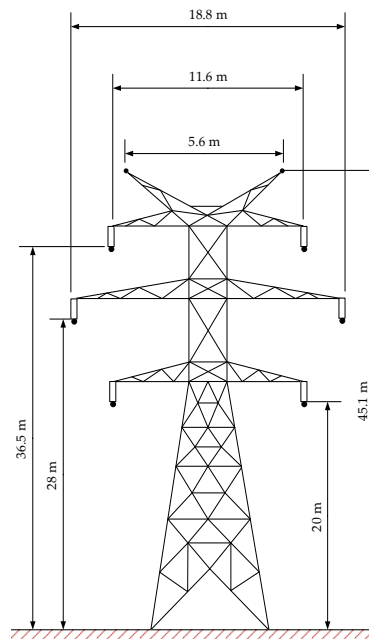
---

<sup>66</sup> La propuesta del IEEE Std. 1243-1997 lo hace, pero en forma implícita mediante la distancia de impacto a tierra. Cabe anotar que el factor que tiene en cuenta la altura varía con ésta sólo hasta 40 m.

falla y tasa de salidas. Así mismo, se discute la interdependencia de éstos con la geometría de la línea y los factores que emplean los modelos. Finalmente, se cuantifican los efectos de los perfiles longitudinal y transversal de la línea, el ángulo de incidencia, polaridad y multiplicidad del rayo en el desempeño del apantallamiento de una línea.

#### 4.1 Análisis de la corriente máxima de falla de apantallamiento

Por medio del análisis geométrico de los diversos modelos de enlace del rayo, en el apartado 2.2.3 se derivaron expresiones que permiten estimar la corriente máxima de falla de apantallamiento para una configuración típica de torre para líneas aéreas de transmisión<sup>67</sup>. En el presente apartado se exponen las diferencias entre tales modelos mediante la aplicación de los mismos a una torre en doble circuito, cuyas dimensiones y disposición de conductores se ilustran en la Figura 4-1.



**Figura 4-1** Torre típica en líneas de transmisión a 400 kV

Se trata de las dimensiones reales para la configuración de la torre de la Figura 3-18. La Tabla 4-1 contiene los resultados del cálculo de la corriente máxima de falla de apantallamiento para dicha estructura. Se emplearon las expresiones (2-19)

<sup>67</sup> Expresiones matemáticas que consideran sólo descargas verticales. La configuración corresponde circuito sencillo con conductores de fase dispuestos horizontalmente y protegidos por dos cables de guarda.

y (2-31) para los EGM y los GM, respectivamente. Además, se tuvo en cuenta el valor de la flecha a medio vano, así: 5.5 m para el cable de guarda y 8.6 m para el conductor de fase.

**Tabla 4-1.** Corriente máxima de falla de apantallamiento [kA] – Torre 400 kV

Modelo de enlace	Torre			Medio vano		
	Fase superior	Fase media	Fase inferior	Fase superior	Fase media	Fase inferior
<b>Electrogeométricos</b>						
Wagner & Hileman (1961) [35]	32.0	22.9	1.5	19.6	14.4	0.8
Young et al. (1963) [37]	15.5	9.2	0.2	7.5	4.7	0.1
Armstrong & Whitehead (1968) [38]	19.2	16.4	3.5	14.6	12.9	2.5
Brown & Whitehead (1969) [39]	21.7	18.4	3.5	16.2	14.2	2.5
Love (1973) [72]	16.1	13.0	2.3	11.7	9.6	1.5
Whitehead (1974) [73]	16.2	13.2	2.4	11.9	9.8	1.6
Suzuki et al.(1981) [74]	41.9	35.0	8.2	32.2	27.3	5.8
Anderson (1982) [11]	27.7	23.9	2.9	19.2	17.7	1.9
IEEE Std. 1243 (1997) [12]	44.0	22.2	2.6	20.0	13.6	1.6
IEEE Std. 1410 (2010) [71]	20.6	17.0	2.5	14.7	12.6	1.7
<b>Modelos Genéricos</b>						
Eriksson (1987) [46]	6.1	7.0	0.0	4.3	6.3	0.0
Rizk (1990) [47]	7.1	7.8	0.0	4.7	6.7	0.0
Cooray & Becerra (2010) [84]	11.6	11.7	0.0	8.2	9.9	0.0
<b>Vargas &amp; Torres (2006) [85, 86]</b>	33.9	28.3	6.6	26.0	22.0	4.7
<b>Cooray, Rakov &amp; Theetayi (2007) [87]</b>	47.1	40.3	11.4	37.4	32.4	8.4
<b>Mikropoulos &amp; Tsovilis (2008) [62, 90]</b>	12.7	11.9	0.0	7.5	8.7	0.0
<b>Grzybowski &amp; Disyadej (2010) [63]</b>	19.2	15.5	0.0	14.0	11.5	0.0

Nótese que, además de la protección que ofrece el cable de guarda, se consideró el apantallamiento que proporcionan los conductores superiores a aquellos ubicados a menor altura. De acuerdo con los resultados, se tiene que los conductores de fase ubicados en el nivel inferior de la torre estarían efectivamente apantallados contra todas las posibles corrientes del rayo; esto para las ecuaciones que consideran explícitamente en su arquitectura la influencia de la altura del conductor, a saber: Young (1961), Eriksson (1987), Rizk (1990), Cooray (2010), Torres (2006), Mikropoulos (2008) y Grzybowski (2010). Lo anterior puede representarse, en forma gráfica, a través de las siguientes figuras:

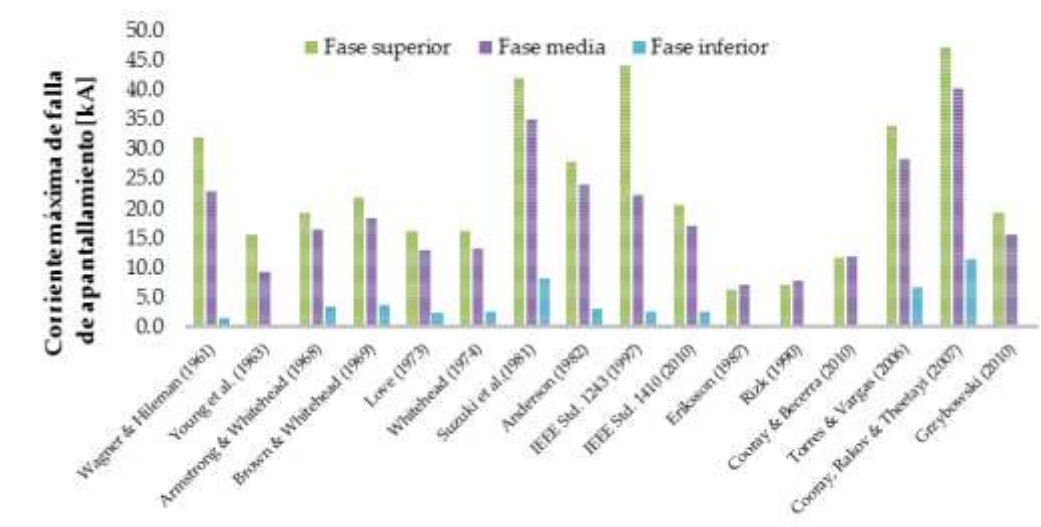


Figura 4-2 Comparación de los modelos de enlace para -  $I_{\max}$  (torre)

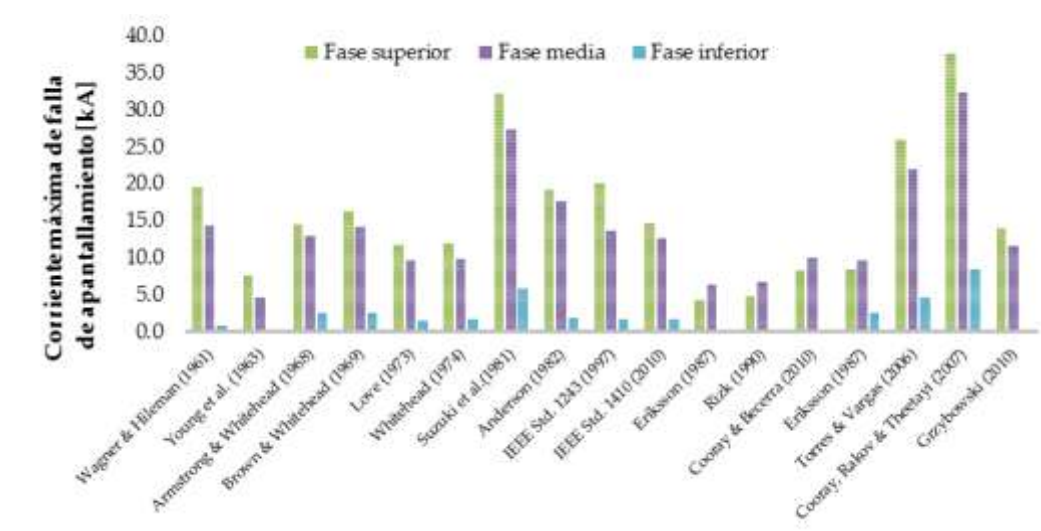


Figura 4-3 Comparación de los modelos de enlace para -  $I_{\max}$  (medio vano)

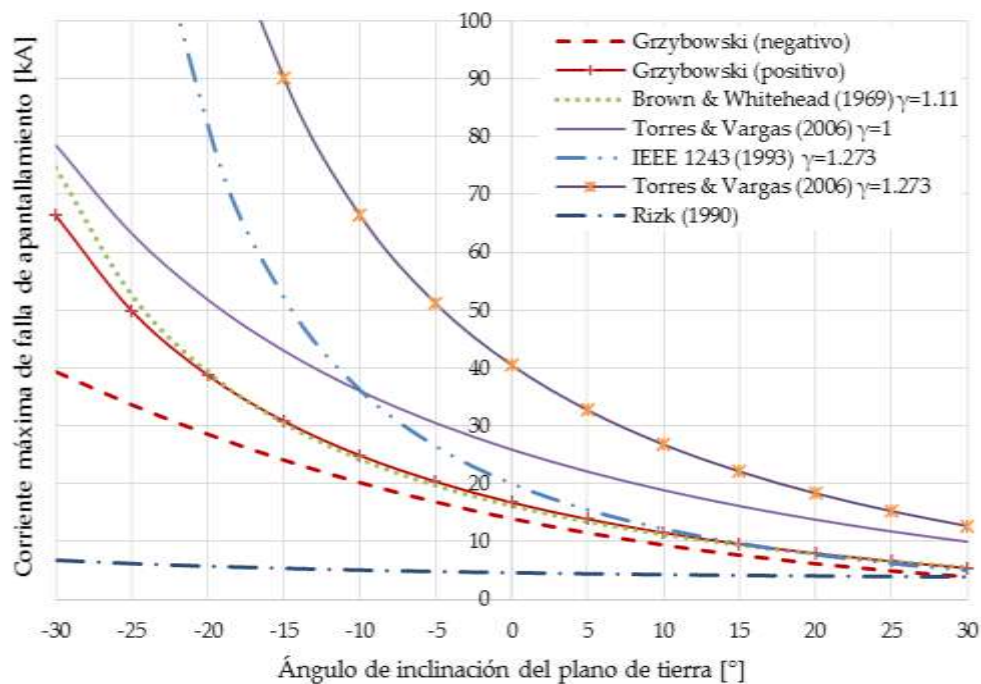
Los datos mostrados evidencian la reducción significativa del valor de  $I_{\max}$  cuando se tiene en cuenta la flecha. De conformidad con la expresión (2-48), si se considera la flecha a medio vano, entonces se reduce la altura del cable (guarda o fase) y, por lo tanto, decrece el ángulo de apantallamiento.

#### 4.1.1 Efecto de la oblicuidad del terreno

Respecto de los resultados presentados hasta aquí, cabe anotar que están referidos a una torre erigida sobre terreno plano; es decir que ningún parámetro relacionado



con la topografía<sup>68</sup> se ha considerado aún; por lo que, para incluir la oblicuidad del terreno en el análisis de la falla de apantallamiento se ha empleado la formulación presentada en el numeral 3.3. En la Figura 4-4 se muestran gráficamente los resultados de aplicar tales ecuaciones a los modelos de enlace seleccionados, referidos al conductor de fase superior en la torre bajo análisis (ver Figura 4-1).



**Figura 4-4.** Corriente máxima de falla de apantallamiento vs Oblicuidad del terreno

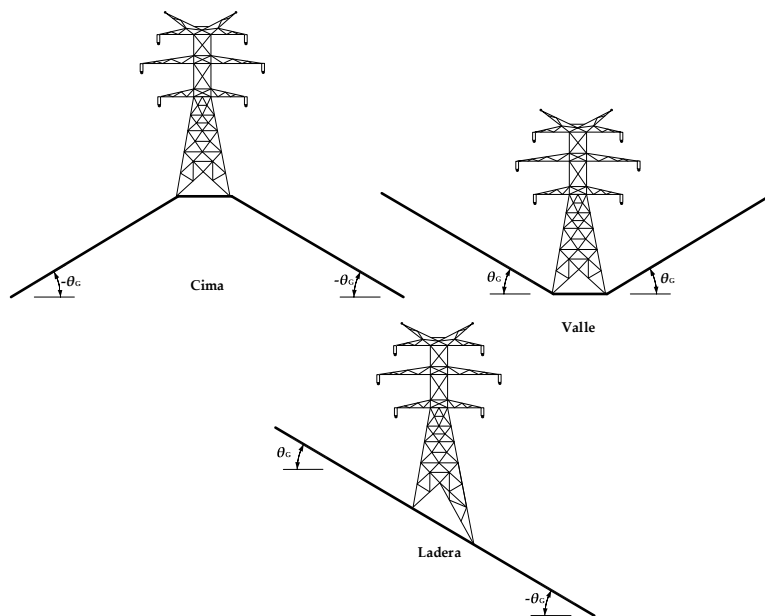
De acuerdo con la figura, se nota la variabilidad de  $I_{\max}$  con la oblicuidad del terreno; en algunos modelos es más acentuada que otros. En el modelo de Rizk esta variación es poco apreciable debido a que las corrientes de falla que arroja son pequeñas en comparación con otras formulaciones; mientras que lo contrario sucede con los modelos de IEEE y Vargas & Torres, donde para terrenos muy inclinados se tiene que los valores de  $I_{\max}$  son tan elevados que dejarían la torre expuesta para todas las corrientes prospectivas del rayo.

Respecto a esto, el autor intuye que el valor de  $\gamma$  es la causa del incremento acelerado en la pendiente de las gráficas correspondientes a IEEE 1243 y a Vargas

<sup>68</sup> Perfiles topográficos: longitudinal y transversal.

& Torres ( $\gamma=1.243$ ). Nótese que esta última considera dos posibilidades, a saber:  $\gamma=1$  y  $\gamma=1.273$ . Recuérdese que  $\gamma$  es un factor que establece diferencias entre las distancias de impacto al suelo y al conductor. La ecuación desarrollada por los colombianos permite estimar la distancia crítica al suelo; comparada con otras ecuaciones, esta muestra una reducción de la distancia crítica al terreno por causa de la tortuosidad del líder descendente. Para poder diferenciar entre la atraktividad del conductor suspendido y el suelo, se adoptó el factor  $\gamma$  del modelo de IEEE 1243 (ver [Tabla 2-1](#)), tal como lo sugiere Horacio Torres en su libro [19]. Con respecto a esto, el autor intuye que el valor de  $\gamma$  es la causa del incremento acelerado en la pendiente de las gráficas mencionadas. Por lo tanto, en concordancia con Mauricio Vargas [85], el autor cree que debería ajustarse el valor de  $\gamma$  para su modelo de forma que pueda aplicarse directamente en el análisis electrogeométrico del apantallamiento para líneas de transmisión y otras estructuras.

En lo referente a la polaridad de la descarga (Grzybowski & Disyadej), la corriente máxima de falla de apantallamiento es mayor para los rayos positivos y la diferencia con los negativos aumenta conforme crece la oblicuidad del terreno.



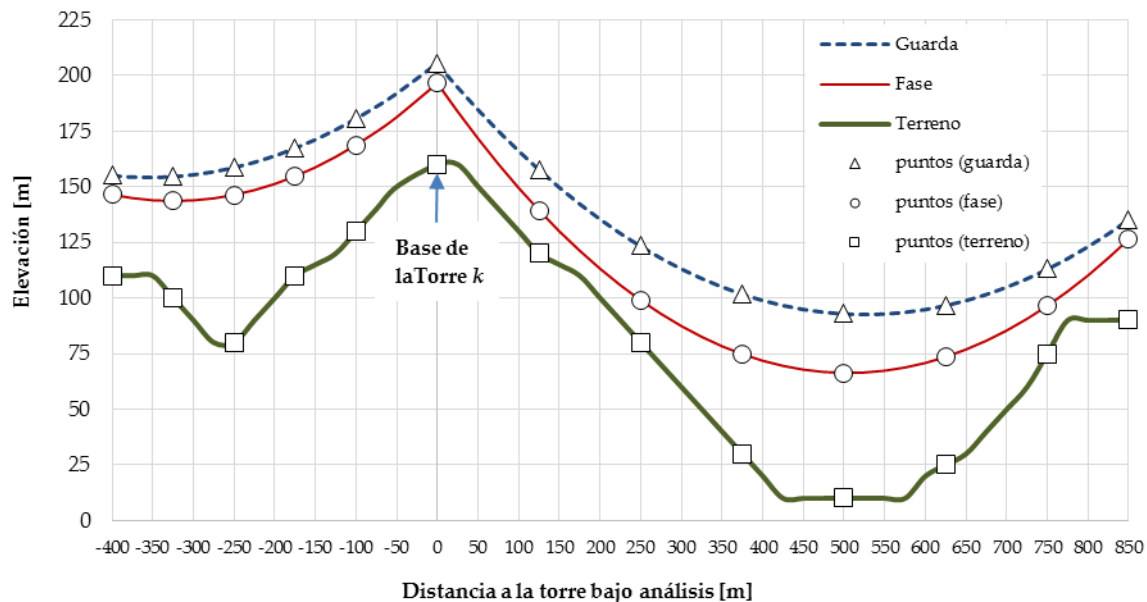
**Figura 4-5.** Perfil topográfico transversal (oblicuidad lateral del terreno)

De estos resultados, se puede deducir que la corriente máxima de falla de apantallamiento se incrementará (exponencialmente) conforme aumente la pendiente lateral del terreno (ángulos negativos de acuerdo con la [Figura 3-13](#)).

Esto sugiere que, con referencia en la [Figura 4-5](#), para una torre ubicada en una ladera, los conductores de fase que estén sobre el lado descendente estarán más expuestos que los suspendidos sobre el lado ascendente; mientras que, para una torre ubicada en una cima el problema de exposición prácticamente se duplica. En otras palabras, el valor de  $I_{\max}$  aumenta cuando la torre se erige sobre cimas o laderas; problema que se exagera con la incidencia de descargas positivas. Esto, además confirma la pertinencia de estudiar ecuaciones para el radio de impacto que consideren explícitamente la polaridad de la descarga.

#### 4.1.2 Efecto de la altura del conductor sobre el suelo

Los datos mostrados en la [Tabla 4-1](#) evidencian la reducción significativa del valor de  $I_{\max}$  cuando se tiene en cuenta la flecha. De conformidad con la expresión (2-48), si se considera la flecha a medio vano, entonces se reduce la altura del cable (guarda o fase) y, por lo tanto, decrece el ángulo de apantallamiento. Este resultado es importante porque permite inferir que la corriente máxima de falla de apantallamiento varía a lo largo de la longitud de la línea debido a que la altura del conductor también lo hace a lo largo de cada vano. Para demostrarlo, considérese la línea de transmisión en la siguiente figura:



**Figura 4-6.** Posición relativa entre el cable de guarda, el conductor y el terreno

En la [Figura 4-4](#) se muestra el cambio de  $I_{\max}$  de la torre  $k$ , sin considerar aún el efecto del cambio de altitud; mientras que en las figuras que siguen, se pueden

apreciar los resultados de tener en cuenta la diferencia entre las alturas relativas entre los cables y el terreno:

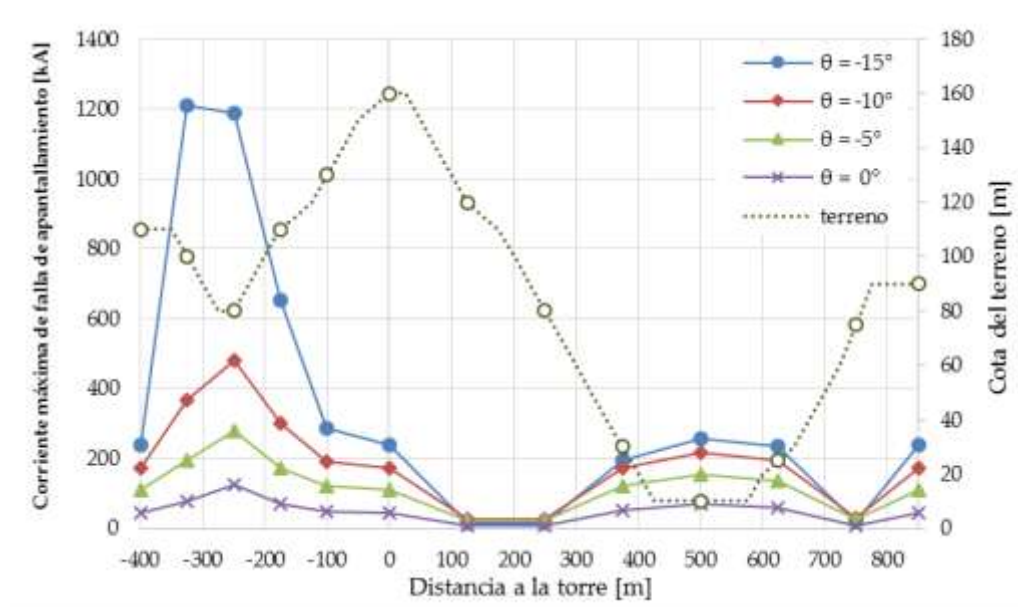


Figura 4-7. Variación de  $I_{\max}$  con el terreno (IEEE 1243) –  $\theta \leq 0^\circ$

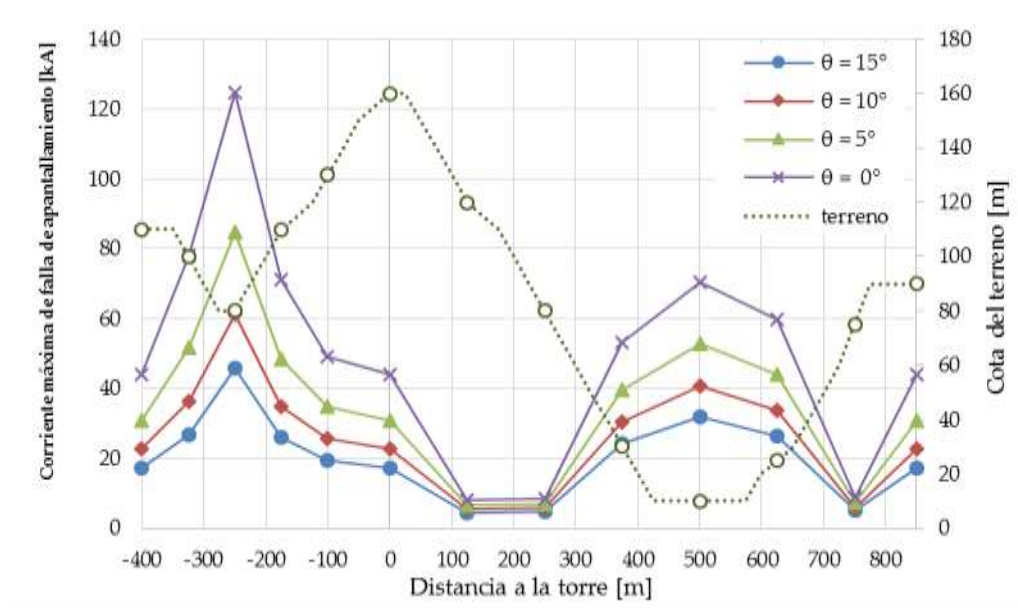
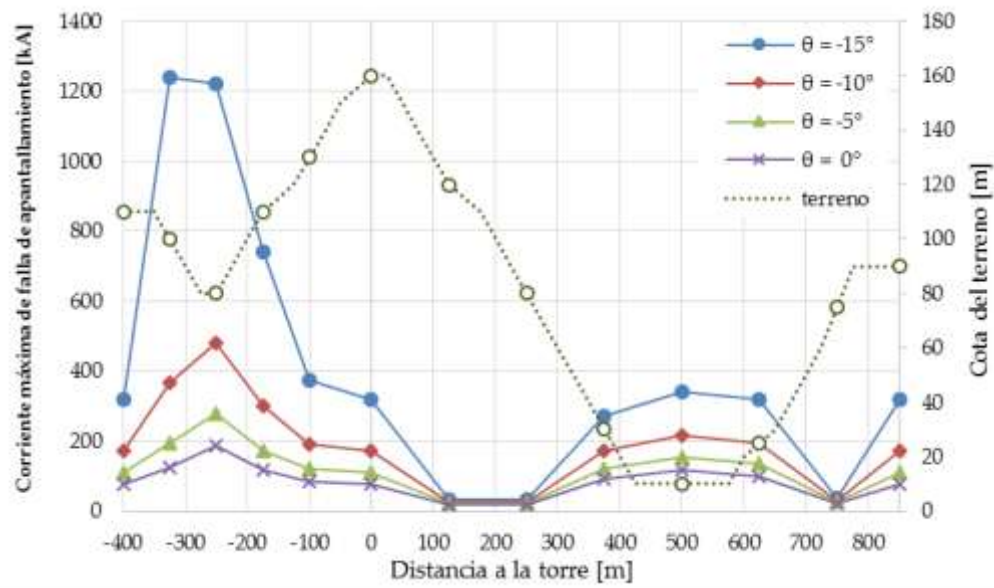
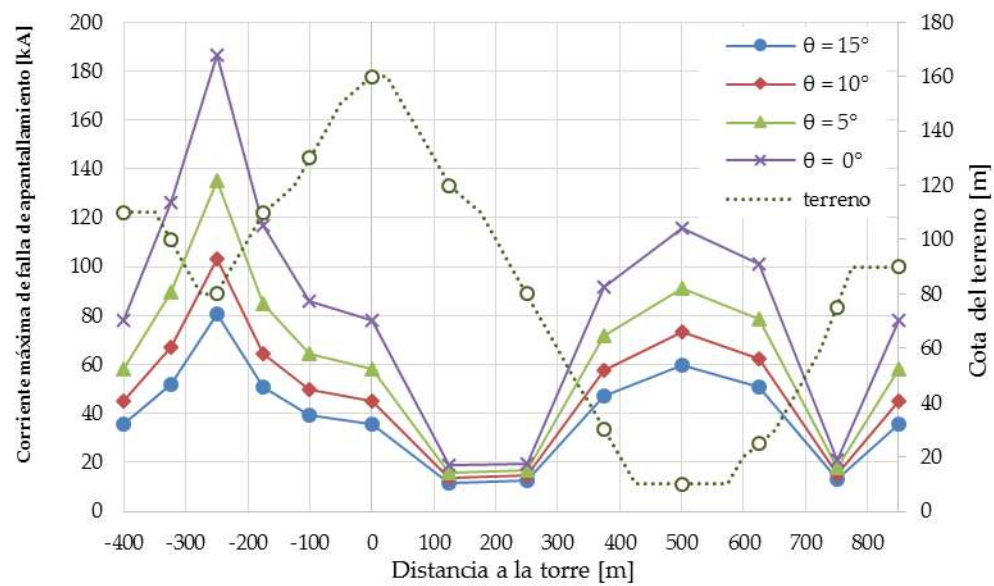


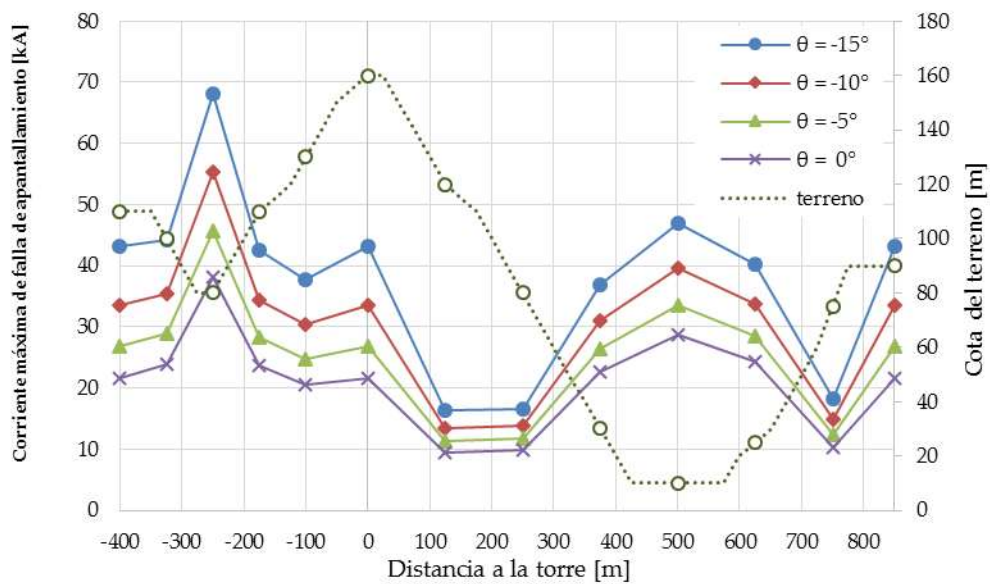
Figura 4-8. Variación de  $I_{\max}$  con el terreno (IEEE 1243) –  $\theta \geq 0^\circ$



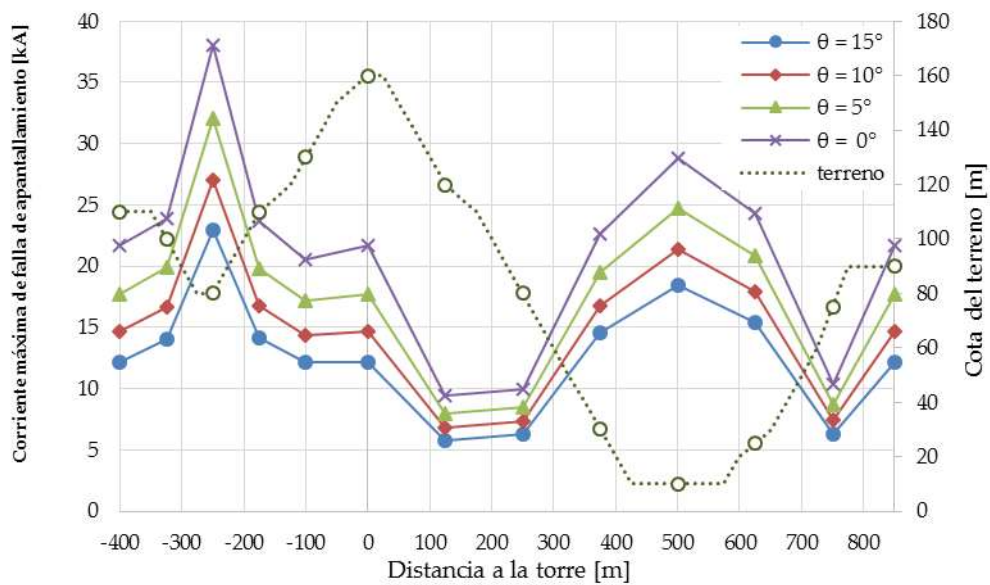
**Figura 4-9.** Variación de  $I_{\max}$  con el terreno (Vargas & Torres) –  $\theta \leq 0^\circ$



**Figura 4-10.** Variación de  $I_{\max}$  con el terreno (Vargas & Torres) –  $\theta \geq 0^\circ$



**Figura 4-11.** Variación de  $I_{\max}$  con el terreno (Brown & Whitehead) –  $\theta \leq 0^\circ$



**Figura 4-12.** Variación de  $I_{\max}$  con el terreno (Brown & Whitehead) –  $\theta \geq 0^\circ$



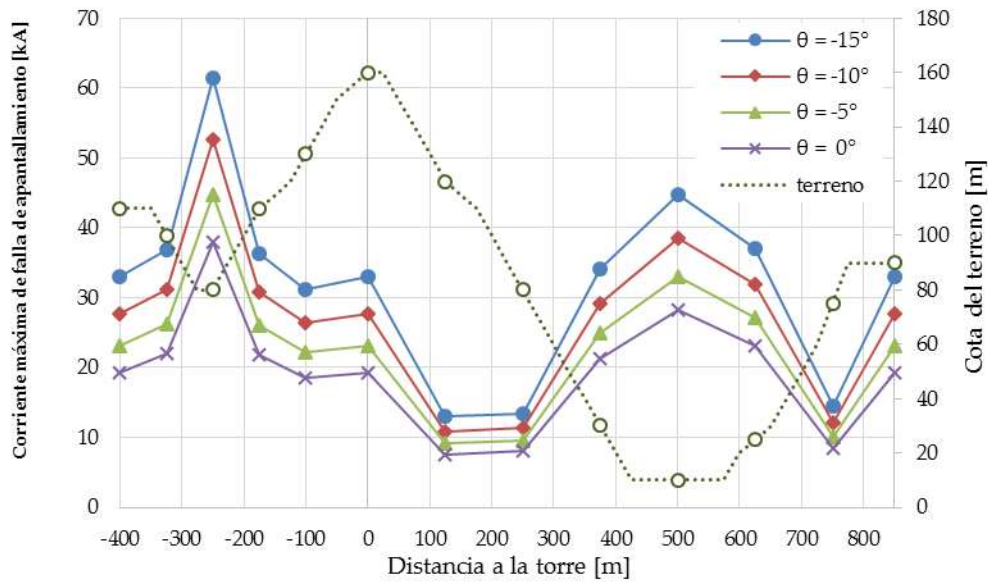


Figura 4-13. Variación de  $I_{\max}$  con el terreno - rayos negativos (Grzybowski) –  $\theta \leq 0^\circ$

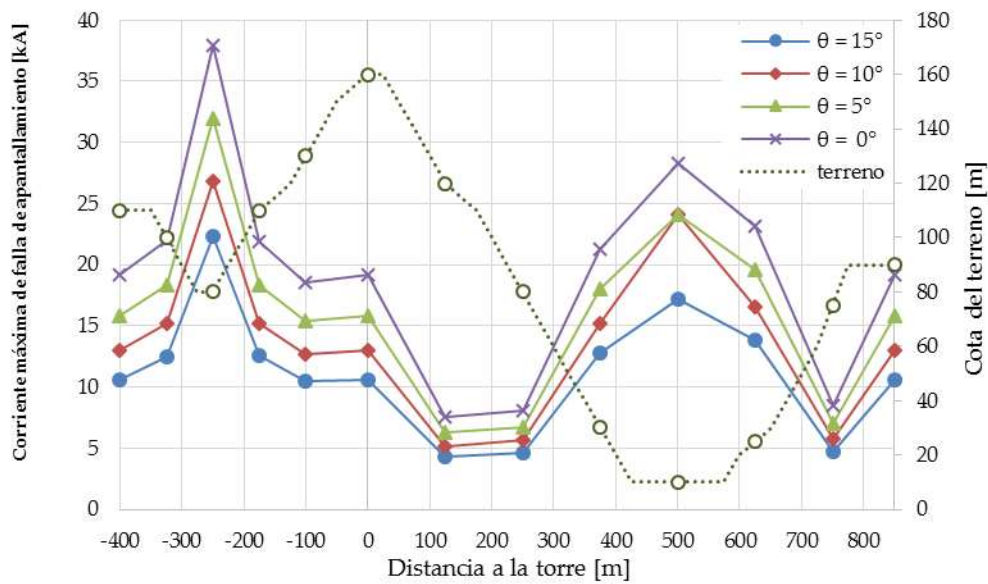


Figura 4-14. Variación de  $I_{\max}$  con el terreno - rayos negativos (Grzybowski) –  $\theta \geq 0^\circ$

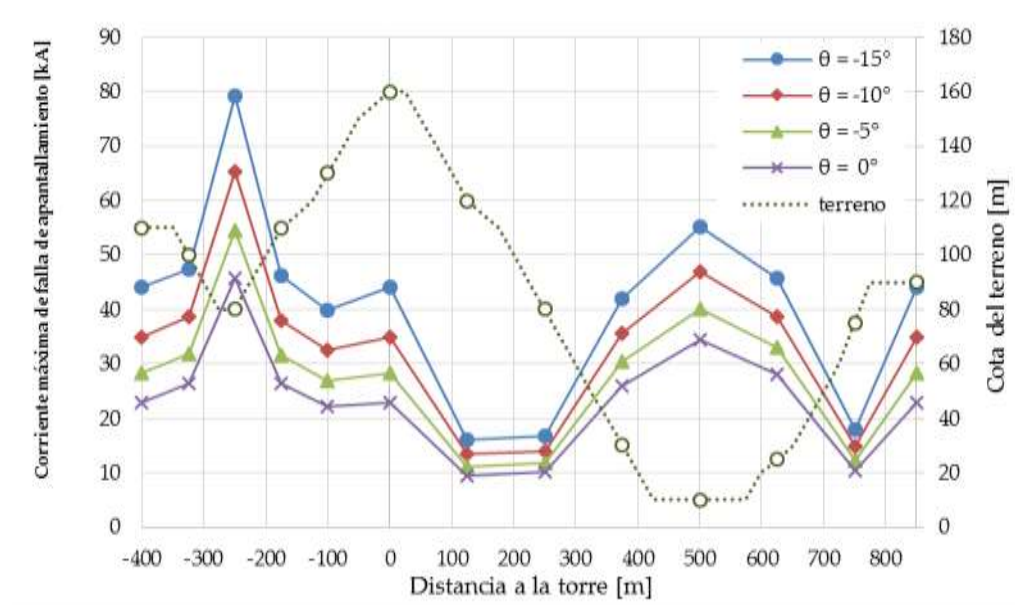


Figura 4-15. Variación de  $I_{\max}$  con el terreno - rayos positivos (Grzybowski) –  $\theta \leq 0^\circ$

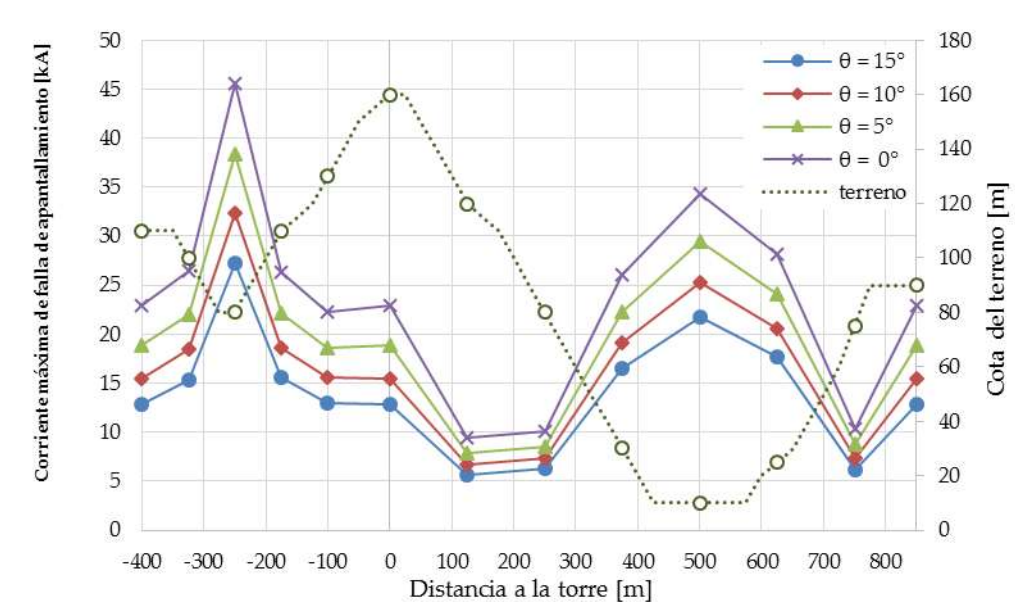


Figura 4-16. Variación de  $I_{\max}$  con el terreno - rayos positivos (Grzybowski) –  $\theta \geq 0^\circ$



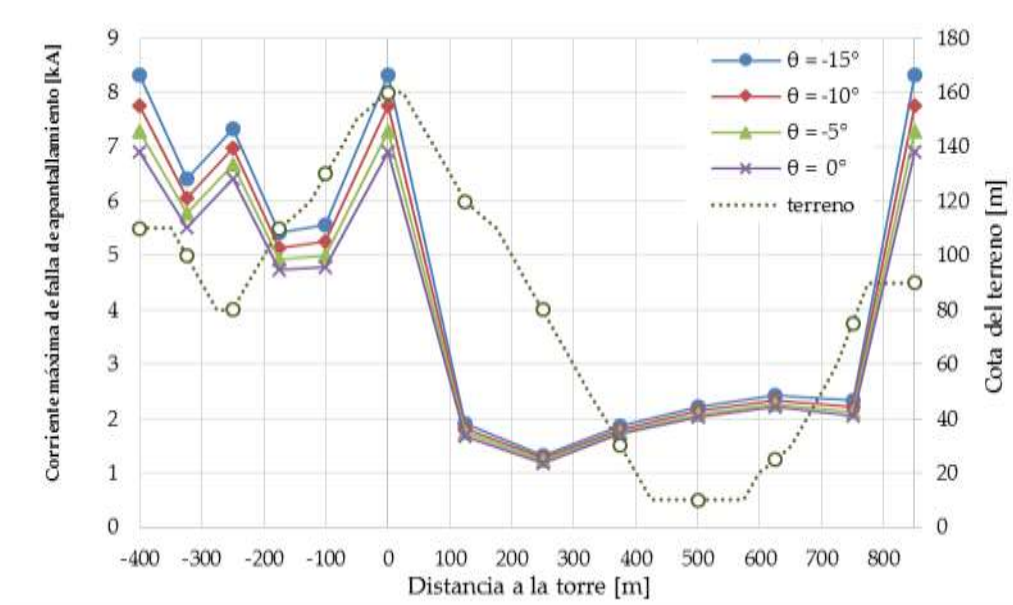


Figura 4-17. Variación de  $I_{\max}$  con el terreno (Rizk) –  $\theta \leq 0^\circ$

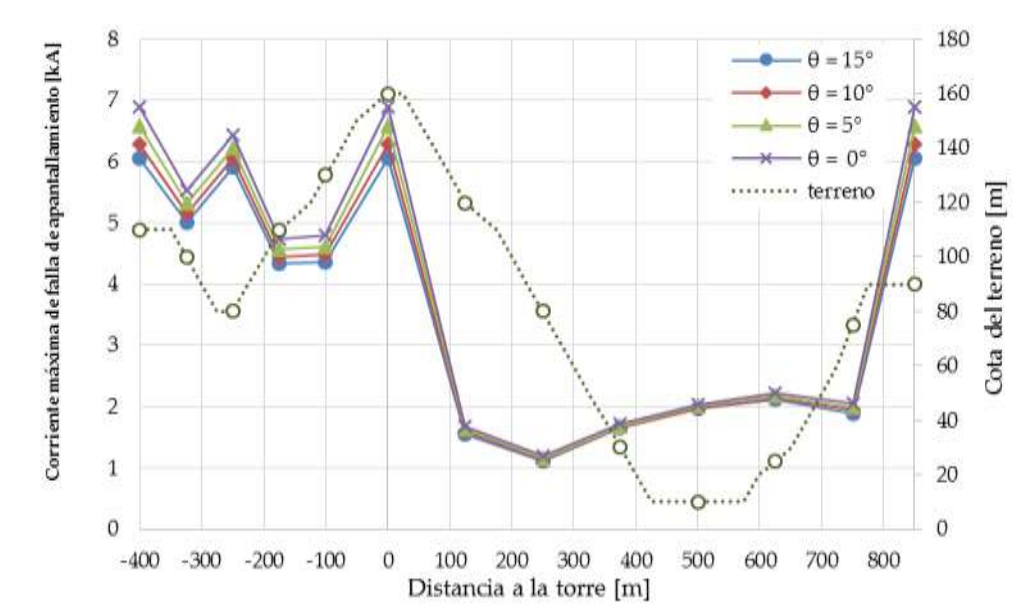


Figura 4-18. Variación de  $I_{\max}$  con el terreno (Rizk) –  $\theta \geq 0^\circ$

Las gráficas corresponden con el estudio del conductor AAAC 927.2 MCM y cable de guarda Alumoweld 7#10 AWG para la fase superior de la torre de la [Figura 4-1](#). Como el cable de guarda tiene características distintas a las del conductor de fase, entonces se comportará de manera diferente ante los cambios de temperatura y sobrecarga, por lo que, en un mismo vano, las flechas y tensiones serán distintas. Por esto, los expertos recomiendan que al cable de guarda se debe tensar de manera que su flecha en condiciones típicas<sup>69</sup> esté alrededor del 80% del valor de flecha del conductor de fase. Esto para asegurar que no se presentarán acercamientos peligrosos a lo largo del vano y que, además, no habrá mucha variación en el ángulo de apantallamiento a lo largo de éste [132].

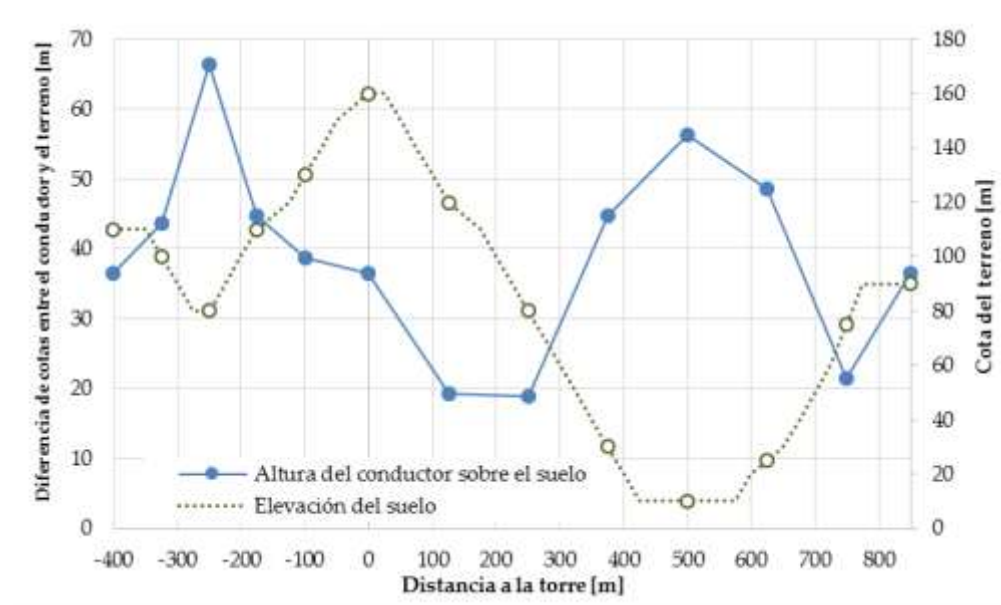
De acuerdo con lo expuesto en el numeral 2.2.3, en términos generales, se tiene que cuanto más alta es la torre, mayor es la posibilidad de que la línea sea impactada por los rayos; lo cual estaría confirmado por las gráficas correspondientes a la implementación del modelo de Rizk, donde, en efecto, los mayores valores de  $I_{\max}$  se dan en las posiciones de las torres (cimas). No obstante, esto no sucede con el resto de modelos, donde la corriente máxima de falla de apantallamiento es mucho mayor en los valles. Por lo tanto, se podría deducir que es la diferencia de alturas entre el conductor y el suelo lo que en líneas aéreas de transmisión determina la propensión de éstas al impacto de rayos. Es diferente el comportamiento de una torre de telecomunicaciones situada en una cima al de toda una línea que discurre por picos, valles y laderas, donde las longitudes de conductores hacen más extenso el “objeto en tierra” al cual se acercará el rayo. En otras palabras, la probabilidad de sufrir el impacto del rayo no la decidiría la elevación de la torre (cota de terreno + altura de la estructura), sino la altura del conductor bajo análisis.

De las gráficas también se puede deducir que el valor de  $I_{\max}$  disminuye con el incremento en la elevación del terreno, pero la tendencia es diferente de acuerdo con la posición. Exceptuando el modelo de Rizk, en el primer valle se tienen corrientes de falla de apantallamiento superiores a las del segundo; esto se debe a que la altura del conductor de fase sobre el terreno es mayor en el primero. Para obtener un mejor panorama de esta deducción, véase la [Figura 4-19](#). Por otro lado, se tiene que cuando los valores absolutos de la pendiente lateral del terreno ( $\theta$ ) son iguales, entonces la corriente máxima de falla de apantallamiento ( $I_{\max}$ ) es mayor

---

<sup>69</sup> En condiciones de temperatura promedio y sin sobrecarga mecánica (viento o hielo); es decir en las condiciones de mayor duración a lo largo de la vida útil de la línea.

para los valores negativos de  $\theta$  que para los positivos, confirmando así la conclusión del numeral 4.1.1.



**Figura 4-19.** Variación relativa de la altura del conductor sobre el terreno

En síntesis, se tiene que la corriente máxima de falla de apantallamiento depende de la topografía del terreno por donde discurre la línea de transmisión; su valor es mayor en los valles que en las cimas cuando se hace referencia al perfil topográfico longitudinal, por lo que la probabilidad de que la línea sea impactada a lo largo del vano es mayor a que lo sea en las torres. Esto podría ampliar más el dominio del SFFOR que el de BFOR en cuanto a las corrientes que causan salidas de la línea. En lo relacionado al perfil topográfico transversal, las cimas y laderas presentan mayor criticidad que los valles en cuanto al aumento de  $I_{max}$ . El autor considera que la diferencia entre los resultados de los EGM y el modelo de Rizk (GM) se debe a que este último no incluye explícitamente el plano de tierra en su análisis de falla de apantallamiento.

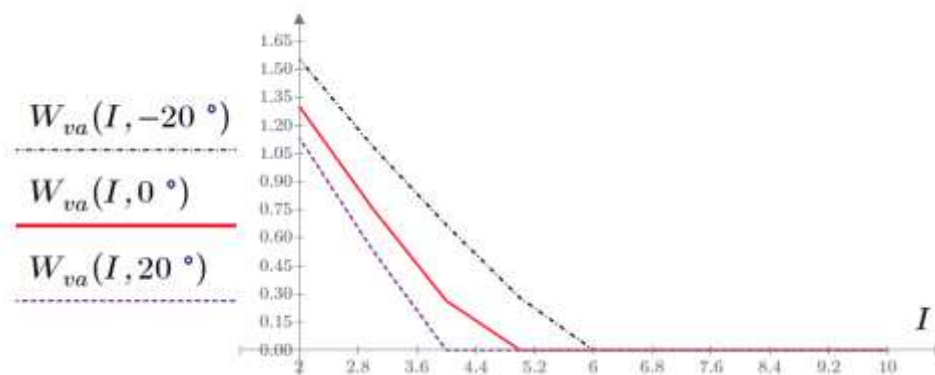
Después del análisis geométrico de la corriente de falla de apantallamiento con respecto a los modelos de enlace seleccionados, se tiene que el considerar sólo las alturas promedio de los cables sobre el suelo, es un enfoque que podría no responder adecuadamente a la topografía específica del corredor de una línea de transmisión, sobre todo si ésta discurre por terreno montañoso. Por ende, se hace necesario reevaluar la posición relativa del cable de guarda y conductores de fase respecto de la elevación del suelo. La formulación propuesta en el numeral 3.6 ha

sido empleada en el ejemplo y ha demostrado que es útil para calcular esta posición.

Finalmente, la interdependencia de la corriente máxima de falla de apantallamiento, la disposición de conductores en la torre y selectos modelos de enlace del rayo, ha sido expuesta a través de una aplicación de estos factores a una configuración típica de una línea de alta tensión en doble circuito. Es evidente la variabilidad en el valor de  $I_{\max}$  entre los modelos de enlace; sin embargo, los resultados concuerdan en que se deben tomar medidas para reducir su valor para las líneas que discurren por terrenos montañosos y así mejorar el desempeño esperado de éstas frente al impacto directo de rayos, especialmente los que tienen polaridad positiva, ya que éstos exacerban el problema. Por esto, se confirma la pertinencia de emplear un modelo de enlace que además de representar explícitamente el plano de tierra, tenga en cuenta la altura de los conductores sobre el suelo y la polaridad de la descarga.

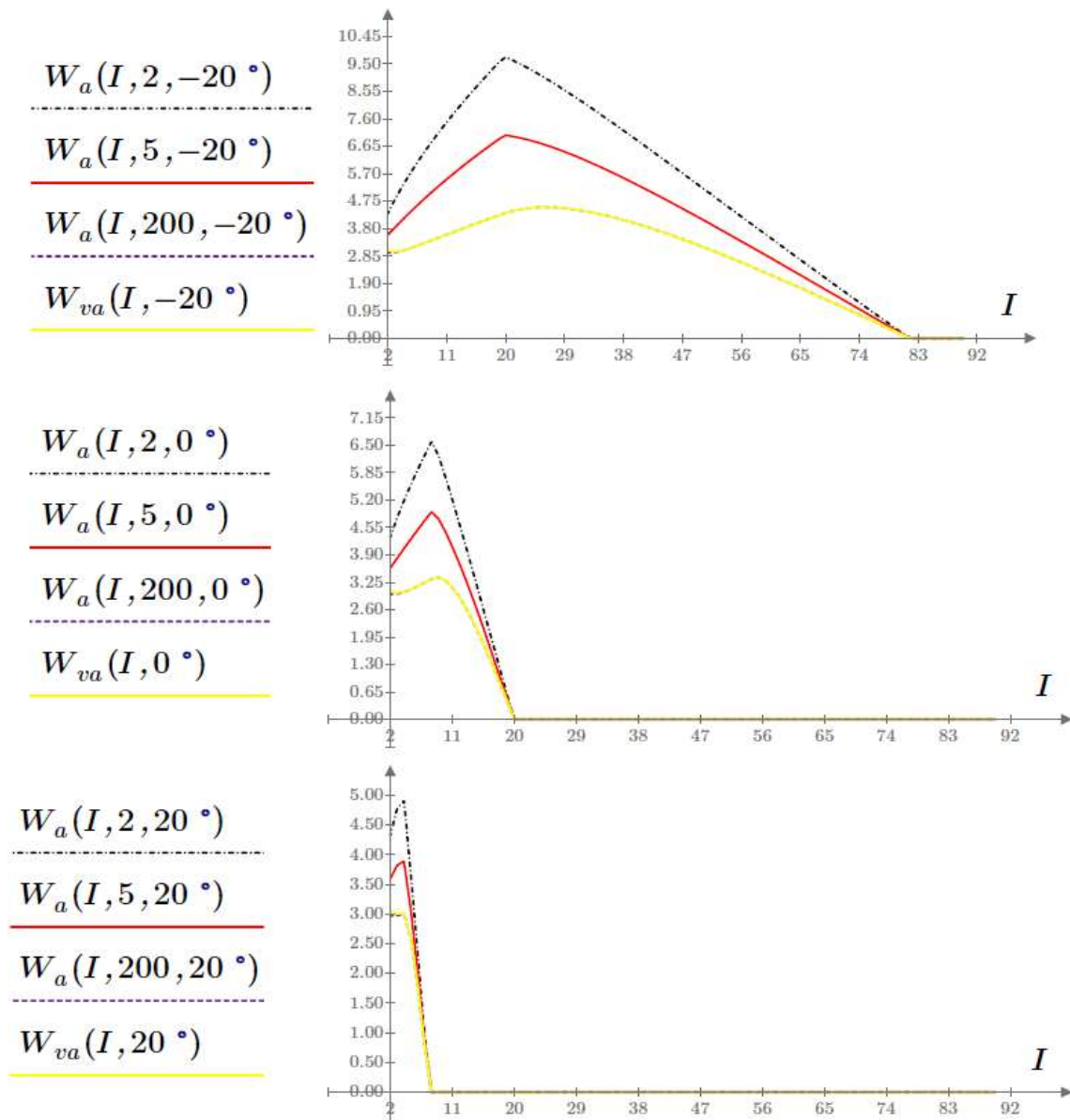
## 4.2 Análisis del ancho expuesto de la línea

De lo presentado en el apartado 2.2.3, se tiene que a medida que crece la corriente máxima de falla de apantallamiento se incrementa también el ancho expuesto de la línea y, por ende, se hacen más probables las salidas por esta causa; situación que, según lo mostrado en 4.1, se agrava cuando la línea discurre por zonas de topografía montañosa y sufre el impacto de rayos positivos. Precisamente, en las ilustraciones que siguen se muestra la variación del ancho expuesto con la corriente pico de la descarga; esto, para los modelos de enlace que se han seleccionado.



**Figura 4-20.** Ancho expuesto ante descargas negativas (Rizk)

Las gráficas corresponden con el estudio del conductor AAAC 927.2 MCM y cable de guarda Alumoweld 7#10 AWG para la fase superior de la torre de la [Figura 4-1](#). Para descargas verticales, el ancho expuesto se ha expresado en función de la corriente pico prospectiva del rayo,  $I$  [kA] y de la oblicuidad lateral del terreno,  $\theta$  [°], así:  $W_{va}(I, \theta)$  [m]. Para descargas no verticales, se ha incluido el parámetro del ángulo de aproximación del rayo,  $m$ , así:  $W_a(I, m, \theta)$  [m].



**Figura 4-21.** Ancho expuesto ante descargas negativas (IEEE 1243)

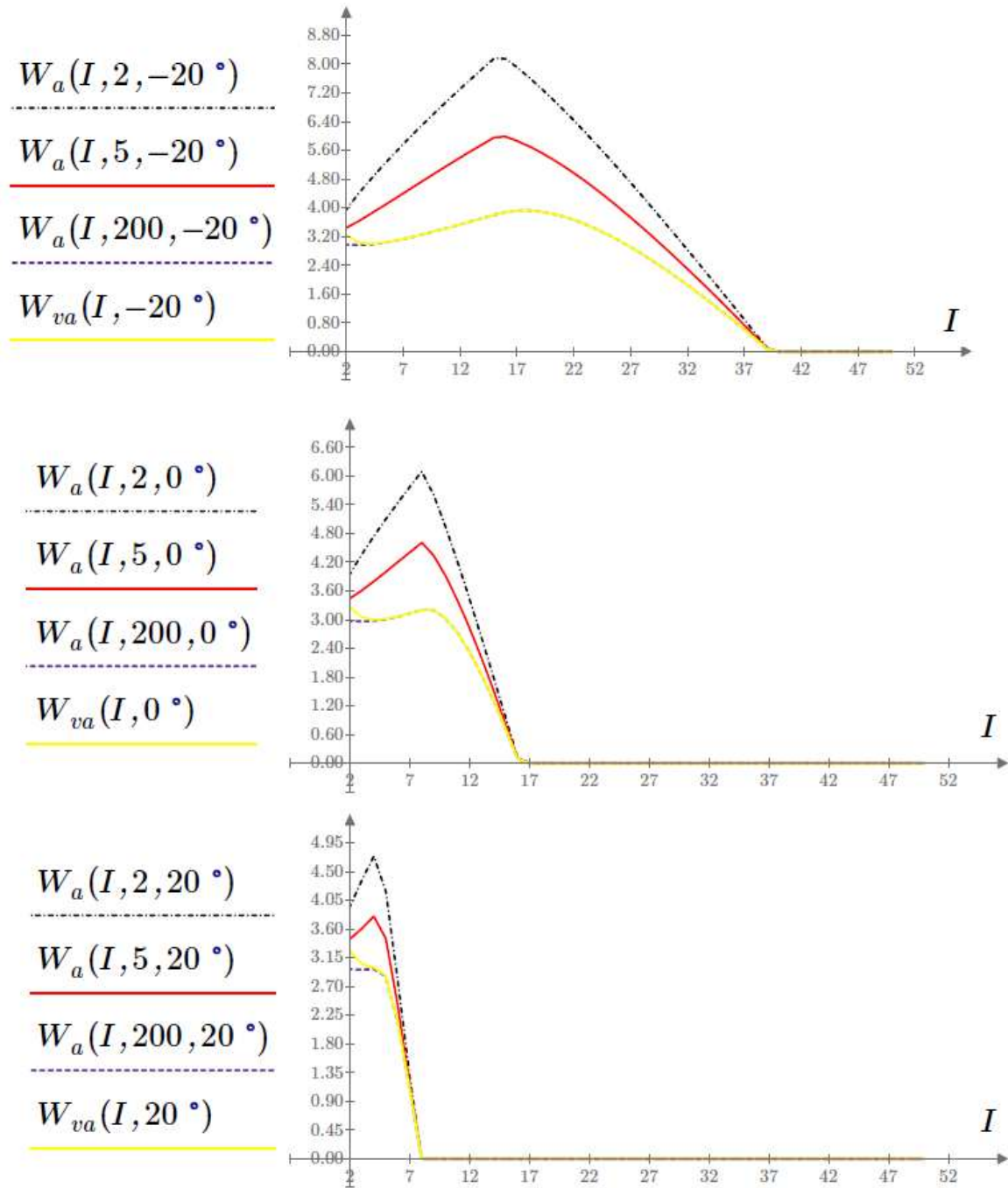


Figura 4-22. Ancho expuesto ante descargas negativas (Brown & Whitehead)



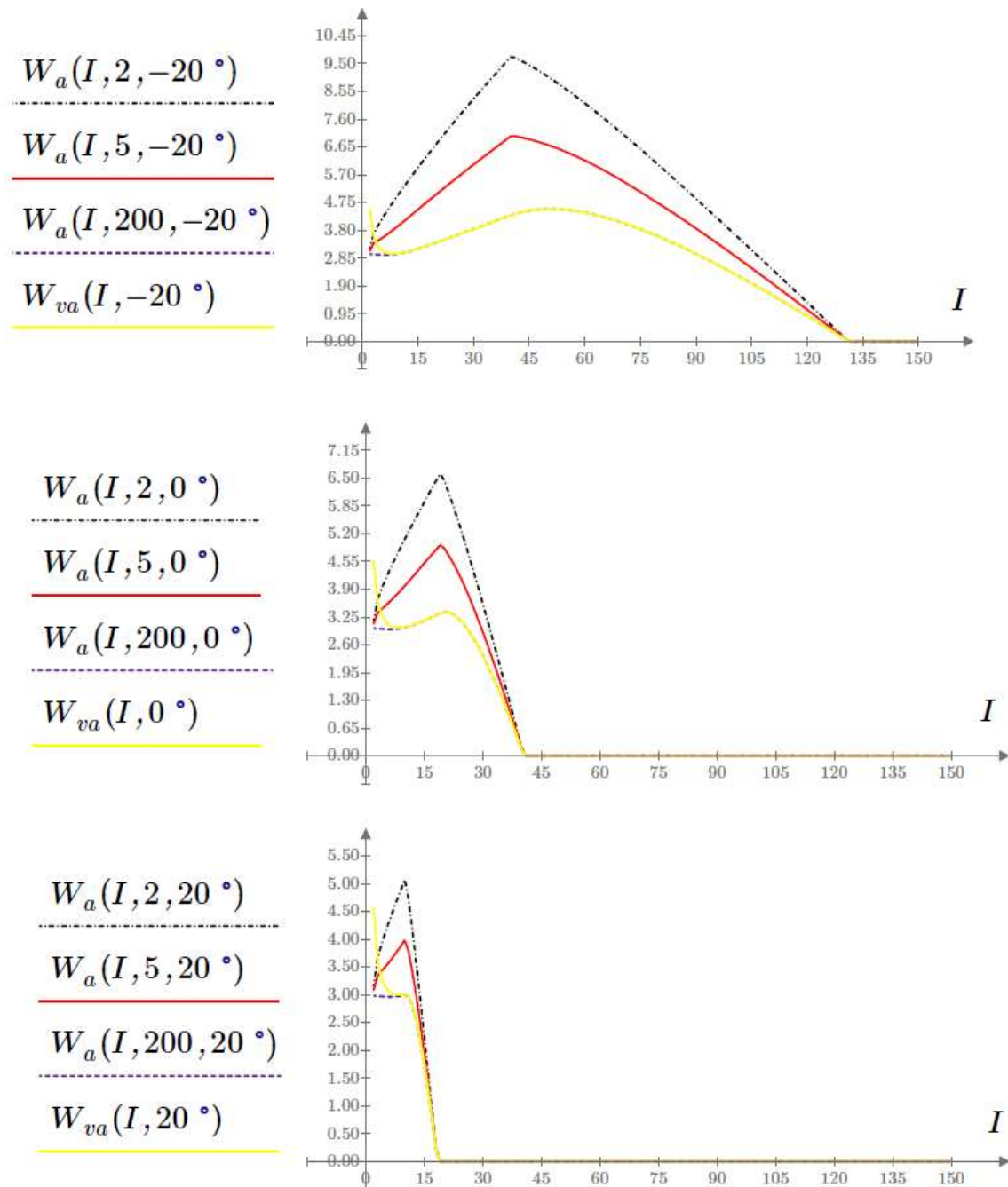
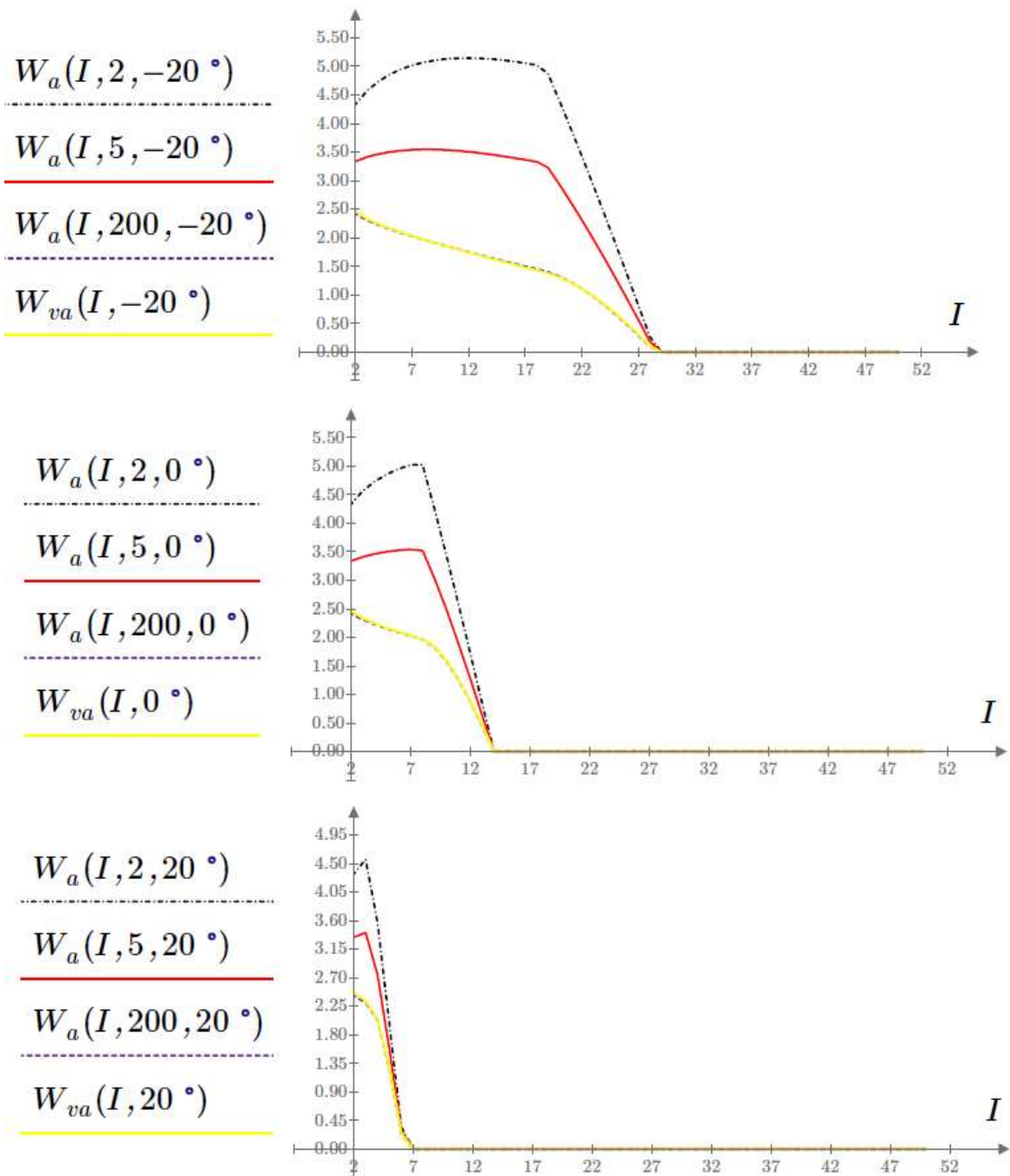


Figura 4-23. Ancho expuesto ante descargas negativas (Vargas & Torres)

En las figuras que siguen, correspondientes a la implementación del modelo de Grzybowski & Disyadej, se muestran dos anchos expuestos,  $W_a(I, m, \theta)$  y  $W_b(I, m, \theta)$  para descargas negativas y positivas, respectivamente:



**Figura 4-24.** Ancho expuesto ante descargas negativas (Grzybowski & Disyadej)



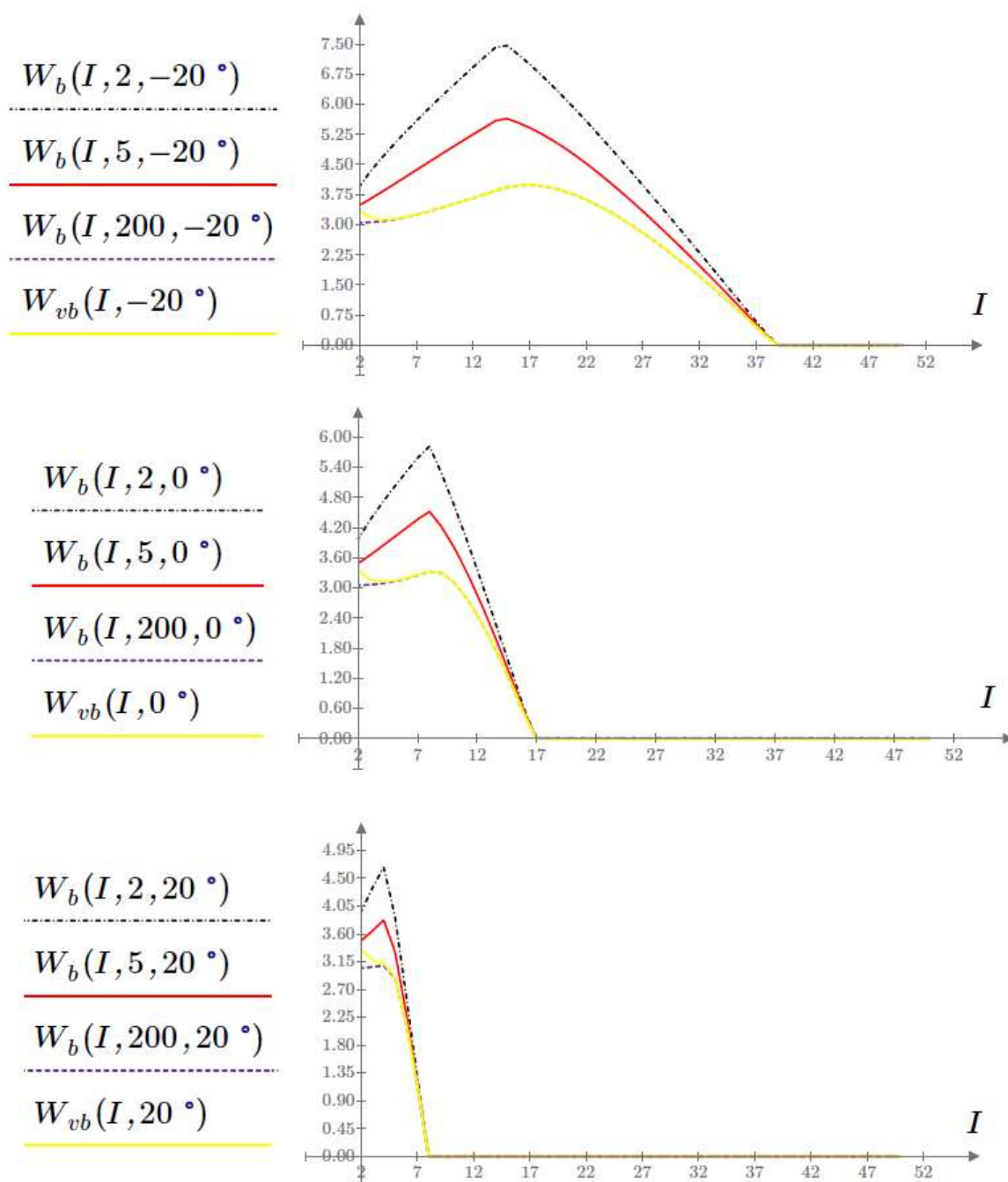
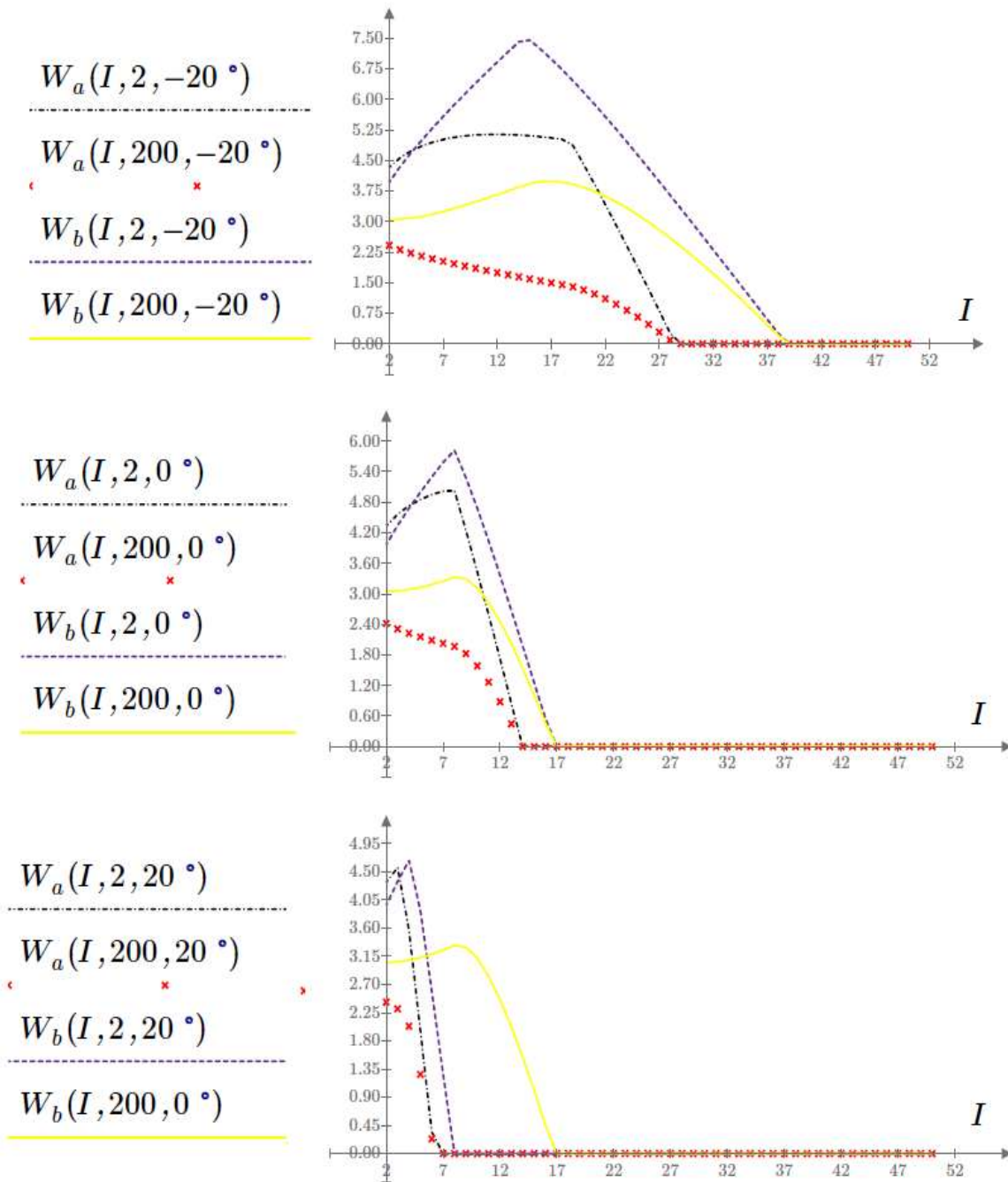


Figura 4-25. Ancho expuesto ante descargas positivas (Grzybowski & Disyadej)



**Figura 4-26.** Ancho expuesto – rayos negativos y positivos (Grybowski & Disyadej)

Como se puede apreciar en las gráficas, la intersección de las curvas con el eje de las abscisas corresponde con un ancho de exposición nulo, lo que a la vez define a la corriente máxima de falla de apantallamiento,  $I_{\max}$ . Además, entre los distintos modelos, se puede notar que existe una variación importante tanto el valor

máximo como en la tasa de decrecimiento del ancho expuesto conforme como aumente la corriente pico de la descarga. De acuerdo con las expresiones planteadas en el numeral 2.2.3.6, estas variaciones pueden afectar significativamente los valores de la *SFR* y la *SFFOR*. Este tema en particular, se tratará en el apartado 4.3. En lo que respecta a la polaridad de la descarga, se puede apreciar que si bien las positivas presentan valores de cresta para *W* mayores que sus opuestas, la tasa de disminución de *W* es mucho menor, por lo que el ancho expuesto se cierra para corrientes de descarga superiores a las que resultarían de los rayos negativos; en otras palabras, se tiene que  $I_{\max}(+) > I_{\max}(-)$ .

Los resultados comentados hasta aquí hacen referencia a líderes descendentes verticales ( $\theta=0^\circ$ ); de conformidad con la sugerencia planteada en el estándar internacional IEEE 1243-1997<sup>70</sup>. No obstante, algunos autores han demostrado que el ancho expuesto varía según la distribución de probabilidad que se asuma para el ángulo de aproximación del rayo (parámetro *m* en la expresión (3-19) y en la Tabla 3-4. El ángulo de aproximación de la descarga se incluyó en el análisis mediante el uso de la formulación planteada en el apartado 3.5. Recuérdese que cuando  $m \rightarrow \infty$  las descargas se aproximan a canales verticales<sup>71</sup>; siendo  $m=2$  el valor recomendado en la literatura. Cuando  $m=0$ , se trata de un caso particular en el que todos los ángulos de aproximación del rayo tienen igual probabilidad de ocurrencia y, por lo tanto, existe la posibilidad de que se presenten descargas horizontales a la línea ( $\Psi = \pm\pi/2$ ). El modelo de Eriksson (1987) [46], adoptado por el programa DESCARGA<sup>72</sup>, está basado en esta premisa, ya que considera la longitud del arco expuesto en vez de su proyección horizontal; enfoque diferente al propuesto en el presente documento.

Cabe anotar que aunque las ecuaciones de Love (1973), adoptadas por IEEE 1243, se desarrollaron considerando descargas verticales, se tiene que algunos autores las han empleado en un análisis electrogeométrico modificado por la inclusión del ángulo de incidencia del rayo [29, 123, 133].

Es evidente la variabilidad en el valor del ancho expuesto,  $W_a$ , entre los modelos de enlace comparados; no obstante, los resultados coinciden en demostrar que la oblicuidad lateral del terreno es un factor importante que no se puede ignorar. Esto

---

<sup>70</sup> Debido a las incertidumbres que aún existen con respecto a la influencia de este parámetro.

<sup>71</sup> De acuerdo con las gráficas,  $m=200$  se aproxima mucho a lo que resulta de considerar sólo descargas verticales.

<sup>72</sup> Desarrollado en la Universidad Técnica de Lisboa con base en las recomendaciones del CIGRÉ WG3301.

debido a que el ángulo  $\theta$  modifica el arco expuesto. Por ejemplo, para laderas descendentes se disminuye el ángulo de apantallamiento, incrementando así el arco expuesto y, por consiguiente, aumentando la frecuencia de fallas de apantallamiento. Esta conclusión es concordante con lo expuesto por Hileman, quien asevera que el ángulo de protección de la torre debería ser, aproximadamente, el ángulo requerido para terreno plano menos el ángulo calculado para laderas ascendentes [78]. La polaridad de la descarga es otro factor que no se debe pasar por alto ya que cuando se trata de rayos positivos el rango de corrientes susceptibles de causar fallas de apantallamiento se amplía. Por último, se tiene que la consideración de descargas no verticales afecta el ancho expuesto,  $W_a$ , en cuanto al valor de cresta obtenido y al valor de corriente que lo produce, más no en el valor de corriente donde  $W_a$  se anula ( $I_{\max}$ ), por lo que también se concluye que el ángulo de aproximación del rayo no modifica la corriente máxima de falla de apantallamiento, pero si el ancho expuesto de la línea.

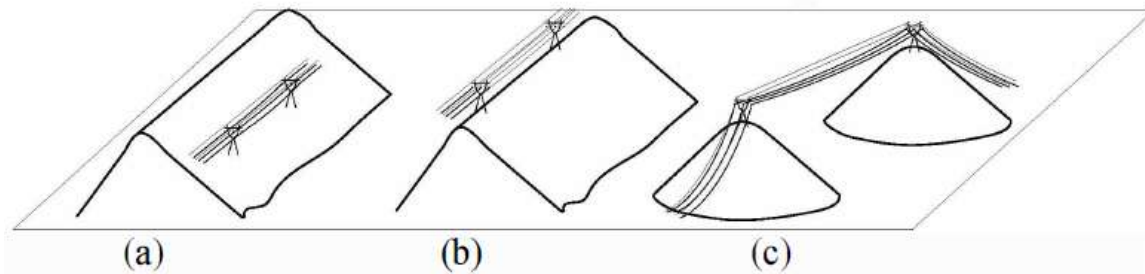
### 4.3 Análisis de la tasa de salidas por fallas de apantallamiento

De lo presentado en el numeral 2.2.3.6, se tiene que el valor de *SFFOR* depende básicamente de la actividad atmosférica, pues a mayor densidad de rayos a tierra, mayor será el valor de *SFFOR*. Otro aspecto a considerar es el de los límites de integración; pues éstos determinan el valor de la integral en la expresión (2-53). Si bien, una combinación entre los parámetros del EGM y la disposición de los cables fijarán el límite superior de integración ( $I_{\max}$ ), será el límite inferior ( $I_{\text{crit}}$ ) el que, para una misma configuración de torre, tendrá influencia en el valor final de *SFFOR*.

En la Tabla 4-2 se muestra la variación en los valores de *SFFOR* de conformidad con los modelos de enlace comparados en el apartado anterior. Adicionalmente al análisis en terreno plano, se plantean tres escenarios relativos a la inclinación lateral del plano de tierra: (a) ladera con pendiente de  $\pm 20^\circ$ , (b) cima con pendientes laterales a  $-20^\circ$  y (c) montículos troncocónicos con pendientes variables (ver Figura 4-27). Los valores consignados en la tabla corresponden a los conductores de un lado de la torre, para tener en cuenta el doble circuito se suman los valores de ambos lados, referidos a un ángulo específico de inclinación del plano de tierra, de la siguiente manera:

- ❖  $SFFOR(\theta_G = -20^\circ) + SFFOR(\theta_G = -20^\circ)$ , para cimas
- ❖  $SFFOR(\theta_G = +20^\circ) + SFFOR(\theta_G = -20^\circ)$ , para laderas descendientes
- ❖  $SFFOR(\theta_G = +20^\circ) + SFFOR(\theta_G = +20^\circ)$ , para valles

❖  $SFFOR (\theta_G = 0^\circ) + SFFOR (\theta_G = 0^\circ)$ , para planicies



**Figura 4-27.** Terrenos básicos para analizar [128]

**Tabla 4-2.** Tasa de salidas normalizada considerando la inclinación del terreno

Descargas verticales, negativas, primera descarga de retorno												
Modelo	$\theta = -20^\circ$				$\theta = 0^\circ$				$\theta = 20^\circ$			
	Fase			Total	Fase			Total	Fase			Total
	Sup.	Med.	Inf.		Sup.	Med.	Inf.		Sup.	Med.	Inf.	
IEEE 1243	1.269	1.398	0.000	2.667	0.196	0.060	0.000	0.256	0.000	0.000	0.000	0.000
Vargas & Torres	1.355	1.796	0.000	3.151	0.640	0.517	0.000	1.157	0.166	0.033	0.000	0.199
Brown & Whitehead	0.697	1.142	0.000	1.839	0.120	0.081	0.000	0.201	0.000	0.000	0.000	0.000
Rizk	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Grzybowski & Disyajec	0.474	0.590	0.000	1.064	0.115	0.061	0.000	0.176	0.000	0.000	0.000	0.000
Descargas verticales, negativas, descargas subsecuentes												
IEEE 1243	1.312	1.462	0.001	2.775	0.239	0.111	0.000	0.350	0.017	0.003	0.000	0.020
Vargas & Torres	1.395	1.846	0.001	3.242	0.680	0.567	0.000	1.247	0.206	0.077	0.000	0.283
Brown & Whitehead	0.739	1.201	0.003	1.943	0.161	0.134	0.000	0.295	0.019	0.007	0.000	0.026
Rizk	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Grzybowski & Disyajec	0.516	0.650	0.002	1.168	0.157	0.113	0.000	0.270	0.017	0.005	0.000	0.022
Descargas no verticales, negativas, primera descarga de retorno												
IEEE 1243	2.474	1.957	0.000	4.431	0.312	0.070	0.000	0.382	0.000	0.000	0.000	0.000
Vargas & Torres	2.695	2.699	0.000	5.394	1.113	0.678	0.000	1.791	0.244	0.033	0.000	0.277
Brown & Whitehead	1.291	1.606	0.000	2.897	0.185	0.095	0.000	0.280	0.000	0.000	0.000	0.000
Rizk	-	-	-	0.000	-	-	-	0.000	-	-	-	0.000
Grzybowski & Disyajec	0.851	0.824	0.000	1.675	0.173	0.070	0.000	0.243	0.000	0.000	0.000	0.000
Descargas no verticales, negativas, descargas subsecuentes												
IEEE 1243	2.555	2.060	0.000	4.615	0.393	0.137	0.000	0.530	0.024	0.003	0.000	0.027
Vargas & Torres	2.754	2.767	0.000	5.521	1.172	0.745	0.000	1.917	0.303	0.085	0.000	0.388
Brown & Whitehead	1.365	1.699	0.000	3.064	0.259	0.167	0.000	0.426	0.027	0.007	0.000	0.034
Rizk	-	-	-	0.000	-	-	-	0.000	-	-	-	0.000
Grzybowski & Disyajec	0.927	0.918	0.000	1.845	0.248	0.141	0.000	0.389	0.023	0.005	0.000	0.028

Los valores empleados para la corriente crítica y la densidad de descargas a tierra son 8.5 kA y 4 rayos/km<sup>2</sup>-año, respectivamente. Los parámetros estadísticos de la corriente del rayo que se utilizaron son los que se recomiendan en [103], a saber:  $\sigma_{lnI} = 0.76$  e  $\bar{I} = 30.1$  kA.

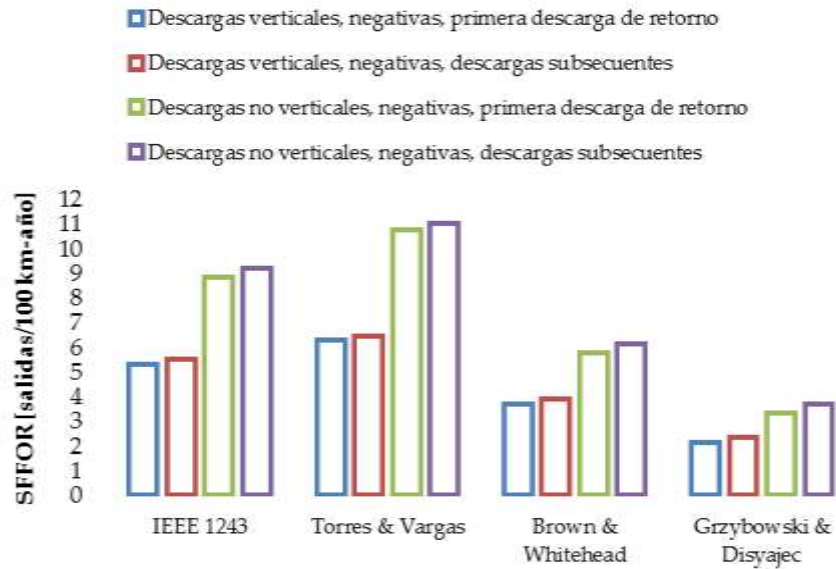


Figura 4-28. SFFOR normalizada para una cima (-20°)

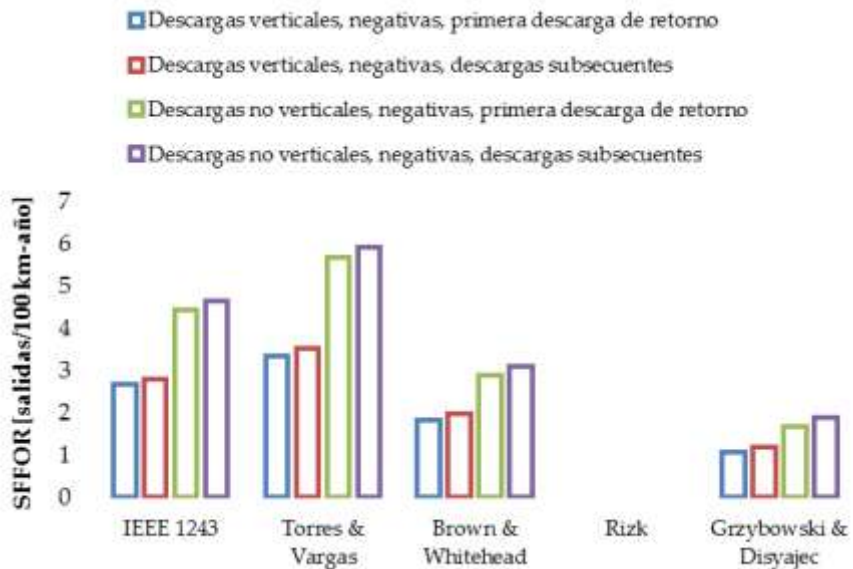


Figura 4-29. SFFOR normalizada para una ladera (±20°)

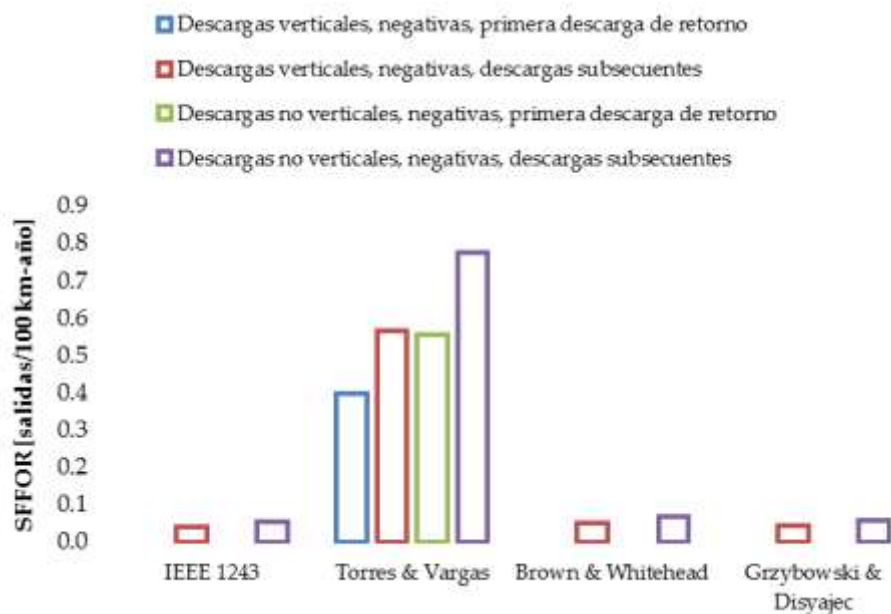


Figura 4-30. SFFOR normalizada para un valle (20°)

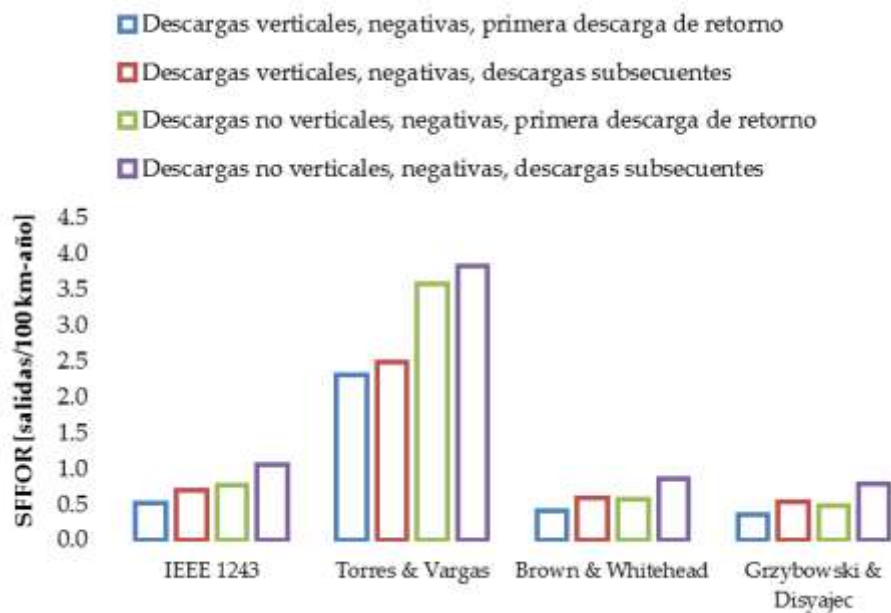


Figura 4-31. SFFOR normalizada para una planicie



En las anteriores figuras se ilustra el resultado de aplicar los datos de la tabla a los tipos de terreno mencionados; se hicieron cálculos para cuatro casos correspondientes a rayos con polaridad negativa, a saber:

- i. Primera descarga de retorno – líder descendente vertical
- ii. Descargas subsecuentes – líder descendente vertical
- iii. Primera descarga de retorno – líder descendente no vertical ( $m=2$ )
- iv. Descargas subsecuentes – líder descendente no vertical ( $m=2$ )

Los gráficos indican la variabilidad en el valor de la *SFFOR* a través de los modelos de enlace seleccionados; sin embargo, los resultados concuerdan en mostrar la influencia que tiene el perfil lateral del terreno en la falla de apantallamiento. En efecto, existe marcada diferencia en considerar planicies, valles, laderas o cimas cuando se trata de calcular la *SFFOR*, siendo éstas últimas las que arrojan los mayores valores. Como se mencionó en el numeral 4.1.1, esto se debe a que a mayor ángulo de inclinación del terreno (pendiente negativa), el conductor se aleja del suelo, haciendo que el efecto atractivo de este último sobre el rayo disminuya y, por consiguiente, aumente el arco expuesto. En el caso de las laderas, esto se aprecia para un lado de la torre; es decir, mientras un circuito estará más alejado del suelo, el otro estará más cerca. Si se trata de cimas o picos, la situación se agrava puesto que ambos lados estarían alejados del terreno. Cuando se trata de valles, éstos actúan como protección o pantalla para la línea.

En referencia al ángulo de aproximación del rayo, se destaca el incremento significativo en la tasa de salidas por fallas de apantallamiento, con respecto a las descargas verticales. Para la torre del ejemplo, el aumento está en el orden del 40% al 70%. Por otro lado, el considerar las descargas subsecuentes también produce un incremento en el valor de la *SFFOR*, pero es de poca magnitud, alrededor del 10%.

Respecto de los modelos, cabe anotar que los mayores valores los arrojan, en su orden, la ecuación de Vargas & Torres y la del IEEE Std. 1243-1997. Esto se debe a que se maneja un factor  $\gamma$  alto (1.273 para la fase superior). De acuerdo con T. Hovarth [134], este factor debería estar en el orden de 1.099 a 1.136 para descargas negativas y entre 0.8 y 0.943, para las positivas, valores afines con las conclusiones de Grzybowski y Mikopoulos [62, 63, 92, 93, 95, 119-121]. No obstante, la recomendación general de A. Mousa para el factor  $\gamma$  cuando se trata con modelos en 3D de líneas de transmisión, está por debajo del rango mínimo para descargas negativas (1.053) [4].



Las figuras que siguen corresponden con los resultados mostrados en los gráficos anteriores, pero presentados conforme cada ecuación para el radio de impacto:

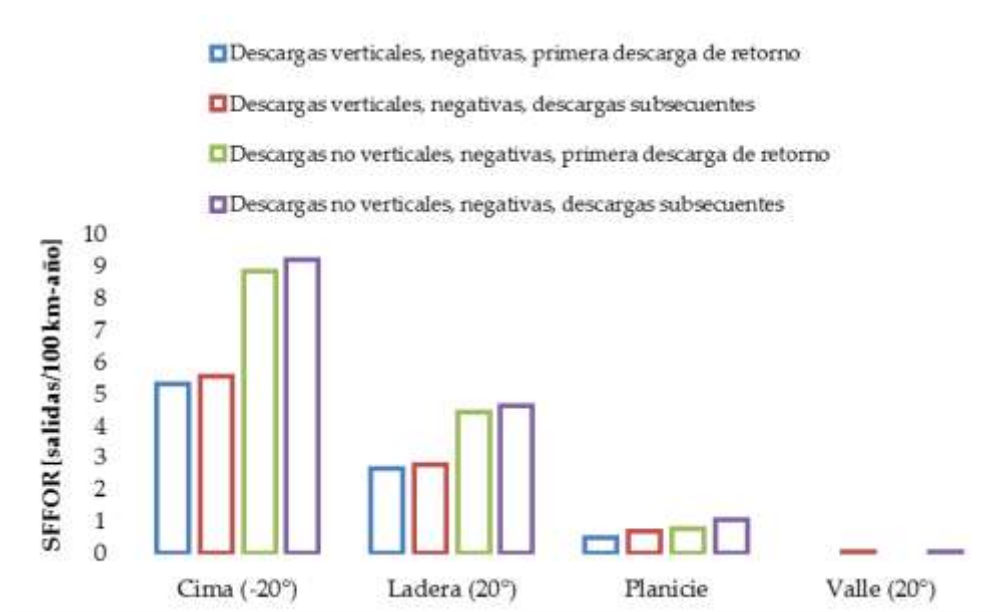


Figura 4-32. SFFOR normalizada (IEEE 1243-1997)

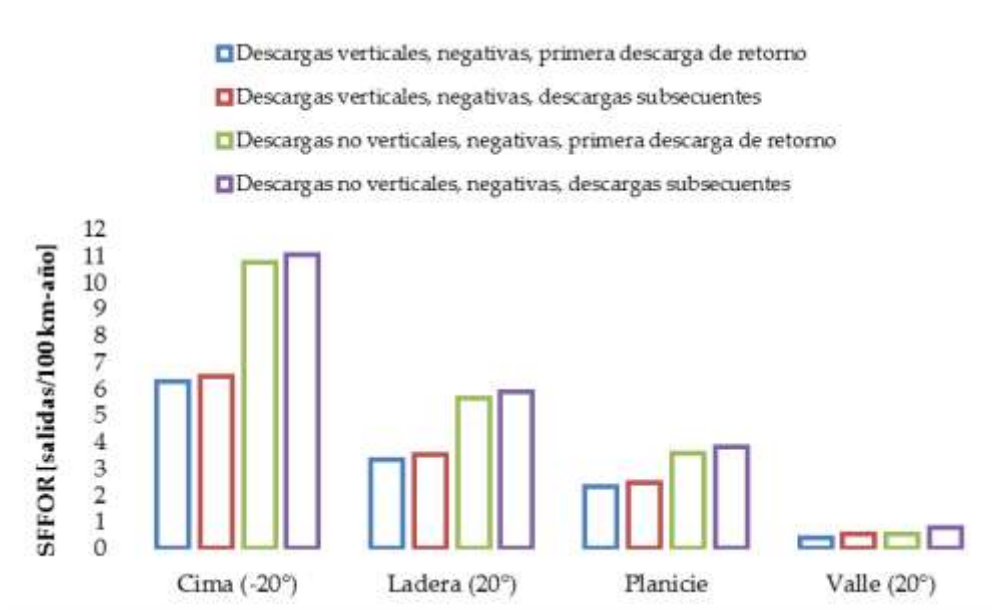


Figura 4-33. SFFOR normalizada (Vargas & Torres)

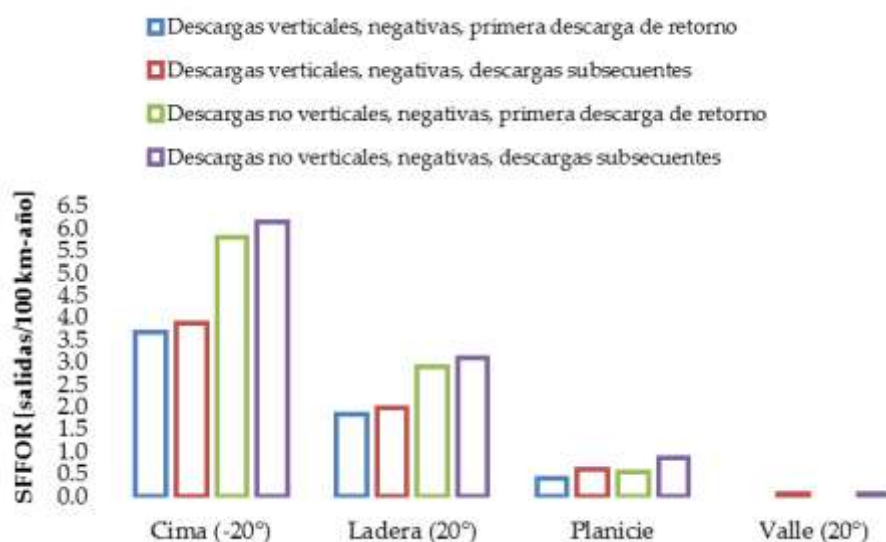


Figura 4-34. *SFFOR* normalizada (Brown & Whithead)

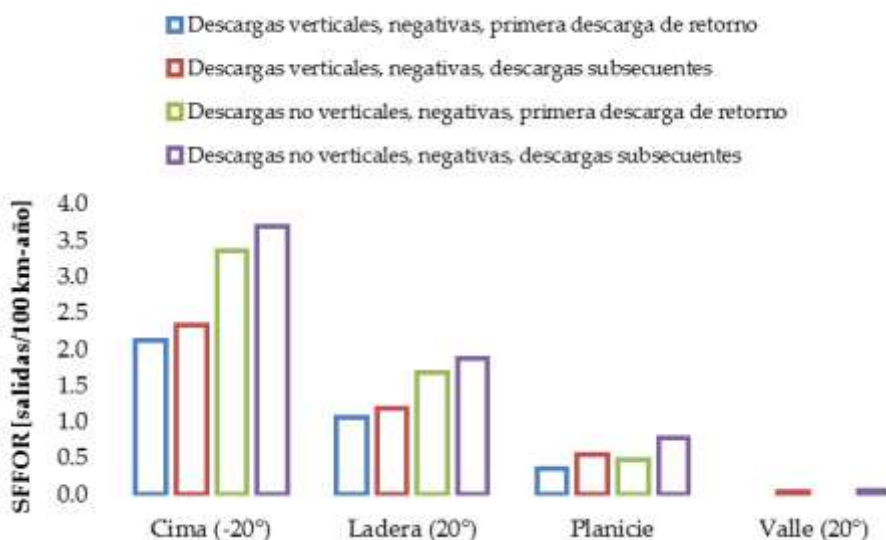


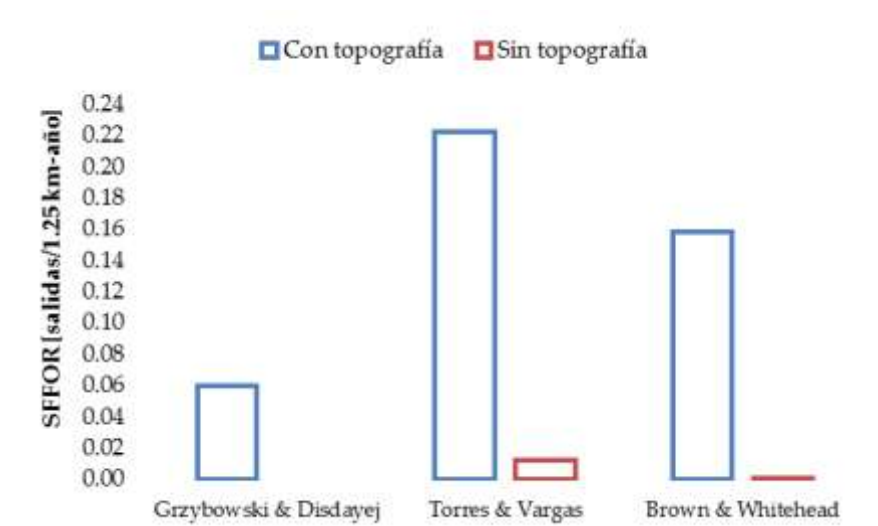
Figura 4-35. *SFFOR* normalizada (Grzybowski & Disyadej)

Es importante tener en cuenta que las gráficas mostradas corresponden a valores netamente referenciales y que su propósito es establecer comparaciones. Aunque se trata de una *SFFOR* normalizada<sup>73</sup>, no es un valor representativo para toda una línea sobre todo si se ha considerado la inclinación lateral del plano de tierra; es

<sup>73</sup> Expresada como número anual de salidas por cada 100 km.

decir, usar este valor de *SFFOR* implicaría asumir que toda la línea discurre por una ladera o que cada una de las torres está ubicada en una cima o la línea pasa exactamente en el centro de un valle por todo su recorrido<sup>74</sup>. Está claro que, aunque poco realista, la suposición de que la línea pasa por terreno perfectamente plano está más aceptada que las demás; de hecho, es lo que se presupone al emplear los estándares internacionales para diseño [12, 71]. Por esto, el autor cree pertinente considerar todas las variaciones de la topografía de una línea, a lo largo y ancho de su corredor, es decir, incluir tanto la variación longitudinal de las cotas de terreno como la variación transversal (pendientes laterales), para lo cual, se puede emplear la formulación propuesta en el numeral 3.6 del presente documento.

Para analizar el efecto de la topografía (perfiles longitudinales y transversales) se ha calculado la *SFFOR* para el tramo de línea que aparece en la Figura 4-6. Se trata de una sección de 1250 m, compuesta por tres torres, cuya geometría se ilustra en la Figura 4-1. Se ha considerado una  $GDF=8$  rayos/km<sup>2</sup>-año,  $I_{crit}=8.5$  kA y los parámetros estadísticos del rayo consignados en la Tabla 3-3, los cuales aplican para el territorio nacional.

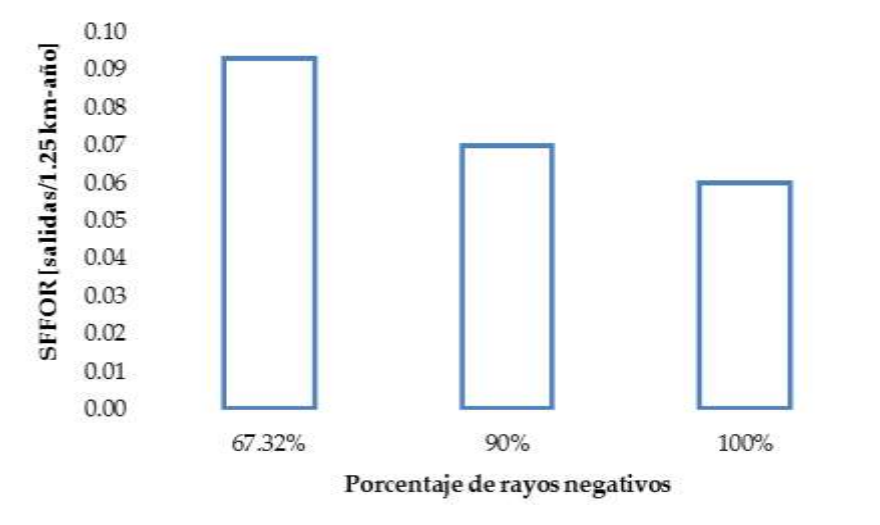


**Figura 4-36.** *SFFOR* no normalizada (Tramo de 1.25 km)

En la Figura 4-36, sólo se comparan los modelos Grzybowski & Disyadej, Brown & Whitehead y Vargas & Torres para descargas negativas no verticales y teniendo en cuenta las descargas subsecuentes. El Modelo del IEEE Std. 1243 se ha considerado

<sup>74</sup> Cima o valle con pendientes laterales iguales o laderas con inclinación uniforme.

como un estándar que no acepta modificaciones, es decir, sólo aplica para descargas negativas verticales en terreno plano, con la opción de tener en cuenta descargas subsecuentes; mientras que la [Figura 4-37](#), se reduce sólo a Grzybowski & Disyadej, porque permite mostrar adecuadamente el efecto de considerar ambas polaridades de descarga.



**Figura 4-37.** SFFOR no normalizada (Tramo de 1.25 km) – Grzybowski & Disyadej

De acuerdo con las figuras, el modelo de Grzybowski sigue presentando los valores más bajos de SFFOR. La causa radica en que las corrientes máximas de falla de apantallamiento son menores que las que arrojaron los otros modelos.

Recuérdese que el principio del apantallamiento consiste en el hecho de ubicar un conductor de guarda por encima de uno de fase, con el objeto de garantizar que, para ciertas magnitudes de descarga, el primero capturaría los rayos que incidan sobre la línea. El rango de corrientes pico que causarían impactos al conductor de fase depende básicamente del ángulo de apantallamiento y de la altura de este conductor respecto del suelo. Para una separación horizontal fija entre el guarda y la fase, se tiene que el ángulo de protección depende de la diferencia de alturas entre ambos cables. Ahora bien, si se varía la altura de la torre, entonces aumentará la separación vertical del conductor de fase al terreno y, dependiendo del factor  $\gamma$ , se tendrá mayor o menor atractividad del plano de tierra sobre el rayo. De esta manera, se busca diseñar la geometría de las torres para que la mayoría de los rayos impacten contra el cable de guarda o en el terreno.

Cuando se aplican las ecuaciones de Grzybowski & Disdayec al método electrogeométrico, considerando sólo descargas negativas, se tiene que el principio del apantallamiento se mantiene, pero se presentan las siguientes diferencias respecto de las otras ecuaciones, a saber:

- ❖ La cantidad de rayos “capturados” por el cable de guarda es mayor ya que la distancia de impacto depende de la altura de éste sobre el plano de tierra.
- ❖ La cantidad de rayos que terminan en tierra obedece a un factor  $\gamma$  que, a su vez, depende de la corriente pico de la descarga. Por lo tanto, la tasa de crecimiento de la atractividad del plano de tierra es mayor y el arco expuesto de la línea se cierra más rápido conforme aumenta la corriente pico de la descarga.

En la aplicación de este modelo, es evidente la influencia de los rayos positivos, los cuales, de acuerdo con la gráfica, incrementaría el valor de la *SFFOR* hasta en un 50% para el caso bajo análisis.

#### **4.4 Conclusiones**

A partir de las formulaciones planteadas en el capítulo anterior, en este capítulo se analizó la influencia de diferentes parámetros en la falla de apantallamiento de una línea de transmisión. Algunos parámetros corresponden a la descarga misma, otros están relacionados con el modelo de enlace y otros con las características topográficas del corredor por donde discurre la línea. Por medio de la aplicación de los modelos a un ejemplo de una torre típica en una región montañosa, resultaron las siguientes conclusiones:

##### **❖ Influencia de la topografía**

La corriente máxima de falla de apantallamiento,  $I_{\max}$ , aumenta conforme se incrementa la altura de los conductores sobre el suelo. En los terrenos que presentan pendientes transversales y/o longitudinales respecto del eje de la línea (zonas de topografía montañosa), es donde la separación de los conductores al nivel del suelo es mayor. Por consiguiente, se tiene que en terrenos montañosos aumentará la probabilidad de que se produzca falla de apantallamiento. Cuando una línea aérea de transmisión discurre por este tipo de terrenos, las torres normalmente se ubican - debido a criterios mecánicos - sobre cimas para así lograr grandes vanos, lo cual, a la luz de los resultados obtenidos en el presente trabajo hace más propensa la ocurrencia de la falla de

apantallamiento a medio vano (donde la separación de conductores al suelo sería mayor). Esta conclusión contradice la creencia general de que la mayoría de impactos sería en las torres por localizarse éstas en las cimas.

#### ❖ **Influencia de los parámetros del rayo**

- *Ángulo de aproximación del rayo.* La falla de apantallamiento aumenta significativamente cuando se consideran descargas no verticales. El incremento puede estar en el orden del 40% al 70% respecto de los resultados que arrojan los cálculos convencionales.
- *Descargas subsecuentes a la primera.* Considerar descargas subsiguientes incrementa ligeramente el valor de la SFFOR (10% más); por lo que, es un aspecto que puede ignorarse en el diseño de líneas de transmisión de extra alta tensión ya que se proyectan con un alto nivel de aislamiento.
- *Polaridad de la descarga.* Es un factor que definitivamente no puede ignorarse en regiones donde el porcentaje de rayos positivos supera el 30% del total de descargas registradas. Teniendo en cuenta sólo descargas positivas, la corriente máxima de falla de apantallamiento es mucho mayor y, por consiguiente, la tasa de salidas de la línea. No obstante, para considerar este aspecto en los cálculos, no basta con adoptar los parámetros estadísticos del rayo correspondientes a este tipo de rayos, sino que se debe emplear un modelo de enlace cuyas ecuaciones para el radio de impacto hayan sido derivadas para esta polaridad en particular.
- *Parámetros estadísticos del rayo.* En Colombia, para los análisis de la falla de apantallamiento es recomendable emplear los parámetros estadísticos<sup>75</sup> del rayo, estipulados en la correspondiente norma técnica nacional ya que, si se usan los valores establecidos en normas internacionales se sobrestimaría la tasa de salidas por fallas de apantallamiento.

#### ❖ **Influencia del modelo de enlace**

El factor que más influye en los resultados a la hora de calcular la tasa de salidas por fallas de apantallamiento es el modelo de enlace. Existe una

---

<sup>75</sup> Media y desviación estándar de la corriente pico de la descarga.

variabilidad importante a través de los diversos modelos. Cada uno tiene sus limitaciones en cuanto a si están o no concebidos para emplearse en un análisis electrogeométrico que incluya el efecto de los parámetros mencionados. Hasta este punto y considerando los aspectos que se buscaba estudiar en la presente tesis, se puede decir que la propuesta más completa corresponde a la de Grzybowski & Disyadej; sin embargo, es la propuesta de Vargas & Torres la más prometedora, puesto que, a partir de la física del rayo, se consideran canales tortuosos<sup>76</sup>. Si bien es cierto que su implementación arrojó los resultados más desfavorables, un ajuste del factor  $\gamma$  podría permitir su uso en el diseño del apantallamiento de las líneas que discurren por el país.

---

<sup>76</sup> El modelo de Grzybowski & Disyadej ha sido derivado de pruebas de laboratorio, donde sólo ciertos aspectos del rayo pueden simularse.

# 5

## CONCLUSIONES FINALES Y TRABAJOS FUTUROS

---

En este capítulo se presentan las conclusiones y los aportes obtenidos durante el trabajo de investigación de esta tesis. Además, durante su desarrollo se han abordado diferentes temas que, independientemente del propósito original, han proporcionado resultados de interés y puntos de reflexión que abren la puerta a trabajos futuros.

### 5.1 Conclusiones

Los modelos de enlace del rayo con las líneas de transmisión se pueden clasificar en dos grandes grupos: Electrogeométricos (EGM) y Genéricos (GM). Los primeros emplean el radio de impacto, mientras que los otros el radio de atracción, conceptos que, aunque diferentes coinciden en revelar la capacidad que tienen las líneas para atraer rayos.

Se sabe que los modelos genéricos están mejor orientados a la física del rayo, pero son los modelos electrogeométricos los que han probado su efectividad en el análisis del comportamiento de las líneas de transmisión ante el fenómeno, por lo que en la actualidad se mantienen como principal herramienta de análisis de la falla de apantallamiento.

En el análisis de la falla de apantallamiento, la corriente máxima de falla tiene un rol fundamental, puesto que su valor influye directamente en el índice de salidas por flameos directos. El ángulo de apantallamiento y la altura del conductor de fase sobre el suelo son los parámetros que determinan el valor de la corriente máxima de falla. Al variar éstos con la topografía de la línea de transmisión, entonces también cambia el valor de  $I_{\max}$  a lo largo de cada vano. Esto, para cualquier modelo de enlace que se emplee en el análisis.

La suposición de que tanto el ángulo de apantallamiento como la altura del conductor de fase sobre el suelo permanecen invariantes a lo largo del recorrido de la línea, resulta en errores a la hora de evaluar la tasa de fallas de apantallamiento (*SFR*), incluso para líneas que discurren por terreno plano.



En los modelos electrogeométricos, la distancia de impacto al conductor no depende explícitamente de la altura de éste sobre el suelo; carencia que manejan a través del factor  $\gamma$ , el cual, ejerce gran influencia sobre la corriente máxima de falla y, por consiguiente, sobre el valor de la *SFR*. Cuando dicho factor aumenta, entonces disminuye el efecto atractivo del terreno y, por ende, se incrementa la tasa de fallas de apantallamiento. Otra limitación de los EGM radica en que sus ecuaciones de impacto han sido derivadas sólo para descargas con polaridad negativa.

Estudios experimentales recientes han demostrado que, para descargas negativas, la altura del conductor sobre el suelo incrementa el valor de la distancia de impacto; mientras que sucede lo contrario con los rayos positivos. Por esto, se han propuesto las ecuaciones de Grzybowski & Disyadej (2010) para estudiar la falla de apantallamiento en líneas de transmisión, a través de la teoría electrogeométrica. Se trata de ecuaciones para el radio de impacto que, además de la altura del conductor sobre el suelo, tienen en cuenta la polaridad de la descarga.

En las regiones montañosas es donde la altura del conductor sobre el suelo varía con la topografía del terreno. Razón por la que se presentaron fórmulas para evaluar la posición relativa de los conductores y cables de guarda respecto de la cota del suelo, también expresiones que permiten determinar la corriente máxima de falla de apantallamiento y la tasa de salidas de la línea. Además, en el análisis, se tuvo en cuenta la probabilidad de ocurrencia de rayos no verticales, lo que hace de esta propuesta un método electrogeométrico mejorado con respecto a los procedimientos tradicionales.

Después de estudiar la influencia de diferentes parámetros en la falla de apantallamiento de una línea de transmisión, algunos relacionados con el modelo de enlace y otros con las características topográficas del corredor por donde discurre la línea, se sacaron las siguientes conclusiones:

- ❖ Las fallas de apantallamiento serán mucho más frecuentes en terrenos montañosos que en planicies.
- ❖ La falla de apantallamiento aumenta significativamente cuando se consideran descargas no verticales.
- ❖ Las descargas subsecuentes a la primera descarga de retorno es un aspecto que puede ignorarse en el diseño de líneas de transmisión de extra alta tensión ya que se proyectan con un alto nivel de aislamiento.

- ❖ La polaridad de la descarga es un parámetro que definitivamente no puede ignorarse en regiones donde el porcentaje de rayos positivos es importante.
- ❖ En los análisis de falla de apantallamiento para línea en Colombia deben adoptarse los parámetros estadísticos del rayo, recomendados para el país en la correspondiente norma técnica nacional.

## 5.2 Aportes

En este trabajo se presenta un nuevo método para evaluar el desempeño de las líneas de transmisión frente a los rayos, en zonas de topografía montañosa. El método se constituye en un EGM mejorado que tiene en cuenta el efecto combinado de la polaridad y el ángulo de incidencia de las descargas. Los resultados indican que con el nuevo método es posible reflejar la variación en la probabilidad de la falla de apantallamiento para cada torre a lo largo de la línea; por lo tanto, puede servir de base para una aplicación informática que permita identificar los puntos que, a lo largo de la línea son susceptibles de causar fallas. Esto representaría una útil herramienta para la toma de decisiones durante el diseño y operación de líneas de transmisión.

Además, se presenta por primera vez una aplicación de los recientes trabajos de Grzybowski & Disyadej (2010) y Vargas & Torres (2006) en el análisis de la falla de apantallamiento de líneas de transmisión. También, se presentan comparaciones entre los modelos electrogeométricos clásicos, los modelos genéricos y las propuestas de Cooray & Becerra (2008), Cooray, Rakov & Theetayi (2007) y Christescu & Leonida (2009), que no habían sido comparadas entre sí en ningún trabajo anterior.

## 5.3 Futuras líneas de trabajo

Con el propósito de ampliar los resultados de esta tesis, en este apartado se proponen varias líneas de investigación, algunas corresponden a una continuación directa del trabajo presentado y pueden abordarse a partir del método descrito en el capítulo **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**; mientras que otras, seguramente requieran de una revisión de los modelos de enlace sugeridos así como de las formulaciones propuestas.

El primer trabajo pendiente es desarrollar un programa informático que permita calcular el índice de salidas de una línea de transmisión por causa de las fallas de

apantallamiento; teniendo en cuenta la densidad de descargas y la topografía a lo largo del trazado de la línea, así como la configuración de conductores y sus tracciones de tendido, además de la polaridad y ángulo de incidencia de los rayos. En este punto, es de interés trabajar con el API de Google Earth® ya que permite obtener las geo-coordenadas y elevación del corredor de la línea; por medio de la integración de paquetes de plantillado como el PLS-CADD®, DLT-CAD® o TL-PRO®, es posible obtener las catenarias que cada conductor forma para cada vano de la línea; luego, conociendo las coordenadas dimensionales de los conductores y cable de guarda, es posible obtener la posición relativa de éstos respecto de la cota del terreno. Se recomienda emplear una *GFD* sectorizada mediante el Método del corredor ya que permite aumentar la precisión en los resultados [8]. Conociendo la *GFD* para cada sector de la línea de transmisión, es posible determinar los puntos críticos que, a lo largo del corredor de la línea, son susceptibles de causar flameos.

Se recomienda incorporar al método propuesto el análisis de la tasa de salidas por flameos inversos y tensiones inducidas. El estudio de la influencia del terreno y de los parámetros del rayo en el fenómeno del flameo inverso, podrían permitir la validación de los resultados a partir de datos que se tengan sobre líneas existentes. Por otro lado, la inclusión del fenómeno de tensiones inducidas permitirá extender el alcance a las líneas aéreas de distribución rurales.

Se recomienda adaptar la formulación planteada en el capítulo 3 para incluir el efecto de la tensión de operación de la línea en la tasa de salidas. Se sabe que el principio del apantallamiento parte de que al estar ubicado por encima del conductor de fase, el cable de guarda brinda su protección para un determinado rango de corrientes prospectivas de la descarga. Esta situación se hace más evidente en los modelos cuyos radios de impacto se incrementan con la altura del conductor. En modelos tan sensibles a este parámetro, como el de Eriksson (1987), se puede dar el caso en el que el círculo de impacto del cable de guarda encierre totalmente al círculo de impacto del conductor de fases y, por ende, haya un apantallamiento eficaz. Pero, si se hace que el radio de impacto al conductor se incremente con el nivel de tensión de la línea, entonces puede suceder lo contrario, es decir, que el círculo de impacto al conductor de fase encierre totalmente al del cable de guarda. Esto se explica porque para ciertas tensiones, el radio de impacto al conductor aumentaría a un ritmo mayor respecto al del cable de guarda y, por consiguiente, no existiría una corriente máxima de falla de apantallamiento. Por todo esto, se tiene que el análisis geométrico del arco expuesto debería replantearse para este tipo de casos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

1. Atlason, V.M., M. Benesz, and J. Kessel, *Analysis and simulation of lightning performance of the 150 kV transmission system in Aalborg*, in *Institute of Energy Technology*. 2008, Aalborg University: Aalborg, Denmark.
2. González Molina, F., *Evaluación estadística del comportamiento de líneas aéreas de distribución frente a sobretensiones de origen externo*. 2001, Universitat Politècnica de Catalunya: Barcelona, España.
3. GREG, *Resolución 098 de 2000*, in *Modificación del Anexo CC1 del Código de Conexión (Resolución CREG-025 de 1995)*, M.d.M.y.E.d.l.R.d. Colombia, Editor. 2000: Bogotá.
4. Mousa, A.M. and K.D. Srivastava, *Modeling of power lines in lightning incidence calculations*. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1990. 5(1): p. 303-310.
5. Yutang, M., et al. *Calculation of Shielding Failure Flashover Rate of Transmission Line Under Micro-topography Condition*. in *Proceedings of the China Society for Electrical Engineers (CSEE)*. 2011.
6. Chang, M. and Y. Gailian, *Analysis for Calculation Method of Shielding Flashover Rate on Common-Tower Double Transmission Line*, in *China International Conference on Electricity Distribution - CIGRE 2010*. 2010: Nanjing, China.
7. Nayel, M., Z. Jie, and J. He, *Analysis of AC and DC Flat Transmission Lines Lightning Shielding Failure*, in *7th Asia-Pacific International Conference on Lightning*. 2011: Chengdu, China.
8. Pramono, E.Y., Z. Reynaldo, and R. Wahyuni, *HV/EHV Transmission Lines Performance Calculation of Lightning Stroke by Using Corridor Method*, in *2011 International Conference on Electrical Engineering and Informatics*. 2011: Bandung, Indonesia.
9. Chisholm, W.A., *The IEEE Flash Program: a structure for evaluation of transmission lightning performance*. *T. IEE Japan*, 2001. 121-B(8): p. 914-917.
10. Visacro, S., R. Dias, and C. Mesquita, *Novel approach for determining spots of critical lightning performance along transmission lines* *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2005. 20(2): p. 1459-1464.

11. Anderson, J.G., *Lightning Performance of Transmission Lines*, in *Transmission Line Reference Book – 345 kV and above*. 1982, Electric Power Research Institute EPRI: Palo Alto, California, USA. p. 546-596.
12. IEEE, *Std. 1243: IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines*. 1997, Transmission and Distribution Committee of the IEEE Power Engineering Society: New York, USA.
13. CIGRÉ, WG 33-01 *Monograph 63: Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines*. 1991.
14. Correia de Barros, M., J. Festas, and H. Milheiras. *Methodologies for evaluating the lightning performance of transmission lines*. in *International Conference on Live Line Maintenance*. 1998. Lisboa, Portugal.
15. McDermott, T.E. *A New version of the IEEE Flash program*. in *Transmission and Distribution Conference and Exposition (IEEE PES 2010)*. 2010. Pittsburgh, USA.
16. Mikropoulos, P.N., T.E. Tsovilis, and D.E. Zlitidis, *Software Development for the Evaluation of the Lightning Performance of Overhead Transmission Lines*, in *45th International Universities' Power Engineering Conference (UPEC 2010)*. 2010: Cardiff, Wales, UK.
17. Kasemir, H.W., *A contribution to the electrostatic theory of a lightning discharge*. *Journal of Geophysics Research*, 1960. **65**: p. 1873-1878.
18. Malan, D.J. and B.F.J. Scholander, *Progressive Lightning: Directly correlation photography and electrical studies of Lightning near from thunderstorms*. *Proceedings of Royal Society (London)*, 1947. **A(191)**: p. 513-523.
19. Torres, H., *Protección contra Rayos*. Segunda ed. 2010, Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia - Icontec Internacional.
20. Uman, M. and V. Rakov, *Lightning: Physics and Effects*. 2003, Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press.
21. Uman, M.A., *The Art and Science of Lightning Protection*. 2008, Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press.
22. Torres, H., *El Rayo: Mitos, leyendas, ciencia y tecnología*. 2002, Bogotá DC, Colombia: Editorial UNIBIBLOS.

23. Silva, J., *Caracterización espacio-temporal de las descargas eléctricas atmosféricas a tierra en la región Caribe colombiana*, in *Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica*. 2013, Universidad del Norte: Barranquilla.
24. Montesdeoca, M., *Análisis computacional de líneas de transmisión para identificar las torres con mayor índice de fallas por efecto de descargas atmosféricas*, in *Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica*. 2008, Escuela Politécnica Nacional: Quito, Ecuador. p. 241.
25. Yugcha, F., *Cálculo del comportamiento de una línea de transmisión frente al flameo inverso, basado en el método de Montecarlo*, in *Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica*. 2010, Escuela Politécnica Nacional: Quito, Ecuador.
26. Vargas, M., *Estudio del comportamiento de líneas de transmisión en Colombia ante rayos, de acuerdo con las metodologías IEEE y CIGRE*. 2002, Universidad Nacional de Colombia: Bogotá, Colombia.
27. Berger, G. and Äit-Amar, *COST P18: The Physics of Lightning Flash and Its Effects*. 2009.
28. Uman, M., *The lightning discharge*. 2001, Mineola, New York, USA: Dover. 377.
29. Martínez Velasco, J.A. and F. Castro Aranda, *Influence of the Stroke Angle on the Flashover Rate of an Overhead Transmission Line*, in *IEEE Power Engineering Society General Meeting*. 2006: Montreal, Canada. p. 1-6.
30. Pando, R., *Aspectos básicos de las descargas atmosféricas*, in <http://www.herrera.unt.edu.ar/revistacet/anteriores/Nro28/PDF/N28Inv02.pdf>. 2006, Universidad Nacional de Tucumán: Argentina.
31. Waters, R., *Lightning phenomena and protection systems*, in *Advances in High Voltage Engineering*. 2004. p. 107-114.
32. Golde, R., *The frequency of occurrence and the distribution of lightning flashes to transmission lines*. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers AIEE, 1945. **64**(Part III): p. 902-910.
33. Bewly, L.V., *Travelling waves on transmission systems*. 1951, New York, USA: John Wiley & Sons, Inc.
34. Wagner, C.F., *The Relation Between Stroke Current and the Velocity of the Return Stroke*. Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on, 1963. **82**(68): p. 609-617.

35. Wagner, C.F. and A.R. Hileman, *The Lightning Stroke-II*. Power Apparatus and Systems, Part III. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1961. **80**(3): p. 622-636.
36. Clayton, J. and F. Young, *Estimating lightning performance of transmission lines*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1964. **83**: p. 1102-1110.
37. Young, F., J. Clayton, and A. Hileman, *Shielding of Transmission Lines*. AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems (S82), 1963: p. 132-154.
38. Armstrong, H.R. and E.R. Whitehead, *Field and Analytical Studies of Transmission Line Shielding*. Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on, 1968. **PAS-87**(1): p. 270-281.
39. Brown, G.W. and E.R. Whitehead, *Field and Analytical Studies of Transmission Line Shielding: Part II*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1969. **PAS-88**(5): p. 617-626.
40. Anderson, J.G., *Calculation of lightning performance of EHV lines*, in *EHV Transmission Line Reference Book*. 1968, Edison Electric Institute: New York, USA. p. 283-308.
41. Anderson, J.G., *Montecarlo Computer Calculation of Transmission-Line Lightning Performance*. Power Apparatus and Systems, Part III. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1961. **80**(3): p. 414-419.
42. Bouquegneau, C., M. Dubois, and J. Trekat, *Probabilistic analysis of lightning performance of high-voltage transmission lines*. Electric Power Systems Research, 1986. **102**(1-2): p. 5-18.
43. Sargent, M.A., *Montecarlo Simulation of the Lightning Performance of Overhead Shielding Networks of High Voltage Stations*. Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on, 1972. **PAS-91**(4): p. 1651-1656.
44. Chowdhuri, P. and S. Mehairjan, *Alternative to Montecarlo method for the estimation of lightning incidence to overhead lines*. IEE Procedures on Generation, Transmission and Distribution, 1997. **144**(2): p. 129-131.
45. Eriksson, A.J., *The Incidence of Lightning Strikes to Power Lines*. Power Delivery, IEEE Transactions on, 1987. **2**(3): p. 859-870.
46. Eriksson, A.J., *An Improved Electrogeometric Model for Transmission Line Shielding Analysis*. Power Delivery, IEEE Transactions on, 1987. **2**(3): p. 871-886.

47. Rizk, F.A.M., *Modeling of transmission line exposure to direct lightning strokes*. Power Delivery, IEEE Transactions on, 1990. **5**(4): p. 1983-1997.
48. Dellera, L. and E. Garbagnati, *Lightning stroke simulation by means of the leader progression model. I. Description of the model and evaluation of exposure of free-standing structures*. Power Delivery, IEEE Transactions on, 1990. **5**(4): p. 2009-2022.
49. Dellera, L. and E. Garbagnati, *Lightning stroke simulation by means of the leader progression model. II. Exposure and shielding failure evaluation of overhead lines with assessment of application graphs*. Power Delivery, IEEE Transactions on, 1990. **5**(4): p. 2023-2029.
50. Phillips, A. and J.G. Anderson, *Computer simulation of lightning flashes to transmission lines*, in *11th International Symposium on High Voltage Engineering*. 1999: London, England.
51. Gayvoronsky, A., K. Karasyuk, and E. Prokofyeva, *Numerical investigations of lightning proofness of UHV overhead lines*, in *27th International Conference of Lightning Protection*. 2004: Avignon, France. p. 1-5.
52. Jinliang, H., et al., *Numerical analysis model for shielding failure of transmission line under lightning stroke*. Power Delivery, IEEE Transactions on, 2005. **20**(2): p. 815-822.
53. Tavakoli, M.R.B. and B. Vahidi, *Transmission-Lines Shielding Failure-Rate Calculation by Means of 3-D Leader Progression Models*. Power Delivery, IEEE Transactions on, 2011. **26**(2): p. 507-516.
54. Jianbiao, L., et al., *A new estimation model of the lightning shielding performance of transmission lines using a fractal approach*. Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on, 2011. **18**(5): p. 1712-1723.
55. JinLiang, H., et al., *Fractal model of lightning channel for simulating lightning strikes to transmission lines*. Science in China Series E: Technological Sciences, 2009. **52**(11): p. 3135-3141.
56. Li, J., et al., *A New Estimation Model of the Lightning Shielding Performance of Transmission Lines Using a Fractal Approach*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011. **18**(5): p. 1712-1723.
57. IEEE, *A Simplified Method for Estimating Lightning Performance of Transmission Lines*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1985. **PAS-104**(4): p. 918-932.



58. Chowdhuri, P., S. Li, and P. Yan, *Rigorous analysis of black-flashover outages caused by direct lightning strokes to overhead power lines*. IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution, 2002. **149**(1): p. 58-65.
59. Ekonomou, L., I.F. Gonos, and I.A. Stathopoulos, *Lightning performance assessment of hellenic high voltage transmission lines*. Electric Power Systems Research - Elsevier, 2008. **78**: p. 703-712.
60. Ametani, A. and T. Kawamura, *A method of a lightning surge analysis recommended in Japan using EMTP*. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005. **20**(2): p. 897-908.
61. Martínez-Velasco, J.A. and F. Castro-Aranda, *Lightning performance analysis of overhead transmission lines using the EMTP*. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005. **20**(3): p. 2200-2210.
62. Mikropoulos, P. and T. Tsovilis, *A statistical method for lightning incidence calculations in transmission lines*, in *16th International Symposium on High Voltage Engineering*. 2009: Cape Town, South Africa.
63. Grzybowski, S. and D. Thongchai, *Laboratory Investigation of Lightning Striking Distance to Rod and Transmission Line (Invited)*, in *2010 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. 2010: Beijin, China.
64. Soilbelzon, H. and J. Vernieri, *Theoretical and practical comparison of shielding wire's position in 132 kV and 500 kV transmission lines in Argentina*, in *International Symposium on Lightning Protection (XI SIPDA)*. 2011: Fortaleza, Brazil. p. 128-132.
65. Wagner, C.F., G.D. McCann, and G.L. MacLane, *Shielding of Transmission Lines*. American Institute of Electrical Engineers, Transactions of the, 1941. **60**(6): p. 313-328.
66. Schwaiger, A., *Der Schutzbereich von Blitzableitern*. 1938, Oldenbourg: Munchen.
67. ICONTEC, NTC 4552-3: *Protección contra descargas eléctricas atmosféricas (Rayos). Parte 3: Daños físicos a estructuras y amenazas a la vida*. 2008: Bogotá, Colombia.
68. Nucci, C. *A Survey on Cigré and IEEE Procedures for the Estimation of the Lightning Performance of Overhead Transmission and Distribution Lines*. in *International Symposium on Lightning Protection (X SIPDA)*. 2009. Curitiba, Brazil.
69. Mikropoulos, P. and T. Tsovilis. *Lightning attachment models and perfect shielding angle of transmission lines*. in *Proceedings of the 44th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*. 2009. Glasgow, Scotland.

70. IEC, *Std. 62305-1: Protection against lightning - Part 1: General principles*. International Electrotechnical Commission. 2010.
71. IEEE, *Std 1410-2010: Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines*. 2011, Transmission and Distribution Committee of the IEEE Power Engineering Society: New York, USA.
72. Love, R., *Improvements on Lightning Strokes Modeling and Applications to the Design of EHV and UHV Transmission Lines*. 1973, University of Colorado: Denver, Colorado.
73. Whitehead, E., *CIGRE Survey of the Lightning Performance of EHV Transmission Lines*. *Electra*. Electra, 1974(27): p. 63-69.
74. Suzuki, T.M., K.; Shindo, T. , *Discharge Path Model in Model Test of Lightning Strokes to Tall Mast*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1981. **PAS-100**: p. 3553-3562.
75. IEEE, *Std. 998: Guide for Direct Stroke Shielding of Substations*. 1996.
76. Mousa, A. and K. Srivastava. *A revised Electrogeometric Model for the Termination of Lightning Strokes on Grounded Objects*. in *International Aerospace Conference on Lightning and Static Electricity*. 1988. Oklahoma City, USA.
77. Cooray, V., *On the Upper Limit of Peak Current in Return Strokes of Lightning Flashes*, in *X International Symposium on Lightning Protection (X SIPDA)*. 2009: Curitiba, Brazil.
78. Hileman, A., *Shielding of transmission lines*, in *Insulation Coordination for Power Systems*. 1999, CRC Press, Taylor & Francis Group: New York, USA. p. 241-273.
79. Holt, R. and T. Nguyen. *Lightning protection of transmission lines: optimal shielding design procedure*. in *IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution*. 2003.
80. Eriksson, A., *The lightning ground flash-an engineering study*. 1979, University of Atal: Pretoria, South Africa:.
81. Eriksson, A.J., *An Improved Electrogeometric Model for Transmission Line Shielding Analysis*. IEEE Transactions on Power Delivery, 1987. **2**(3): p. 871-886.
82. Yuan, X., *Investigation on the striking distance of lightning strokes to overhead lines*. 2001, Tennessee Technological University: Cookeville, Tennessee.

83. Cristescu, D. and T. Leonida, *Critical feedback on the methods of determining the impact of lightning on power system objects*, in *IEEE Bucharest Power Tech Conference*. 2009: Bucharest, Romania. p. 1-7.
84. Cooray, V. and M. Becerra, *Attractive Radius and the Volume of Protection of Vertical and Horizontal Conductors Evaluated using a Self Consistent Leader Inception and Propagation Model - SLIM*, in *30th International Conference on Lightning Protection - ICLP 2010*. 2010: Cagliari, Italy.
85. Vargas, M. and H. Torres, *Lightning leader model for straight, tortuous or branched channels - Part II: Model results*. Elsevier: Journal of Electrostatics, 2008. **66**: p. 489-495.
86. Vargas, M. and H. Torres, *Lightning leader model for straight, tortuous or branched channels - Part I: Model description*. Elsevier: Journal of Electrostatics, 2008. **66**: p. 482-488.
87. Cooray, V., V. Rakov, and N. Theethayi, *The lightning striking distance-Revisited*. Journal of Electrostatics - Elsevier, 2007. **65**: p. 296-306.
88. Ait-Amar, S. and G. Berger, *A Modified Version of the Rolling Sphere Method*. Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on, 2009. **16**(3): p. 718-725.
89. ICONTEC, *NTC 4552-1: Protección contra descargas eléctricas atmosféricas (Rayos). Parte 1: Principios generales*. 2008: Bogotá, Colombia.
90. Mikropoulos, P.N. and T.E. Tsovilis, *Estimation of Lightning Incidence to Overhead Transmission Lines*. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010. **25**(3): p. 1855-1865.
91. Mikropoulos, P. and T. Tsovilis, *Lightning attachment models and maximum shielding failure current: Application to transmission lines*, in *IEEE Bucharest Power Tech Conference*. 2009: Bucharest, Romania.
92. Mikropoulos, P. and T. Tsovilis, *Interception probability and neighboring effects: Implications in shielding design against lightning*. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009.
93. Mikropoulos, P. and T. Tsovilis, *Interception probability and shielding against lightning*. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009.
94. Mikropoulos, P. and T. Tsovilis, *Striking distance and interception probability*. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008. **23**(3): p. 1571-1580.

95. Mikropoulos, P. and T. Tsovilis, *Interception radius and shielding against lightning*, in *29th International Conference on Lightning Protection*. 2008: Uppsala, Sweden. p. 1-11.
96. IEEE, *Estimating Lightning Performance of Transmission Lines II - Updates to Analytical Models*. IEEE Transactions on Power Delivery, 1993. 8(3): p. 1254-1267.
97. Bypgcdopf, *Lightning Protection of Overhead Transmission Line and Operation Experiments in CCCP*. 1959, Moscú, URSS: National Energy Press.
98. Koctenko, M.B., *Probability of lightning shielding failure of transmission lines: Operation experiments and overview*. Elektrichestvo, 1961(4): p. 20-26.
99. McGorman, W., T. Donald, and D. Rust, *The Electrical Nature of Storms*. 1998: Oxford University Press.
100. Torres, H. *Norma Técnica Colombiana de Protección contra Rayos: Filosofía y Resultados*. in *Seminario Internacional de Seguridad, Riesgo, Calidad y Protecciones Eléctricas*. 2006. Medellín, Colombia.
101. Torres, H., *Ground Flash Density : definition of the appropriate grid size and a proposal of relationship Ng vs. Td for Tropical zones*. 2003, Cigre.
102. Al. and A. A., *Two types of lightning discharge to a high stack on the coast of the sea of Japan in winter*. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997. 12(3): p. 1222-1231.
103. IEEE, *Parameters of lightning strokes: A review*. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005. 20(1): p. 346-358.
104. Yokohama, S., et al., *Winter lightning on Japan sea coast - Development of measuring system on progressing feature of lightning discharge*. IEEE Transactions on Power Delivery, 1990. 5(3): p. 1418-1425.
105. Anderson, R.B. and A.J. Eriksson, *Lightning parameters for engineering applications*. Electra, 1980. 69: p. 65-102.
106. Martínez Velasco, J.A. and F. Castro Aranda, *Lightning Characterization for Flashover Rate Calculation of Overhead Transmission Lines*, in *IEEE Power Engineering Society General Meeting 2006*. 2006: Motreal, Canada. p. 6.
107. Cooray, V. and H. Pérez, *Some features of lightning flashes observed in Sweden*. Journal of Geophysics Research, 1994. 99(D5): p. 10683-10688.

108. Rakov, V., M. Uman, and R. Thottappillil, *Review of lightning properties from electric field and TV observations*. Journal of Geophysics Research, 1994. **99**(D5): p. 10745-10750.
109. Diendofer, G., W. Schulz, and V. Rakov, *Lightning characteristics based on data from the Austrian lightning location system*. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1998. **40**(4): p. 452-464.
110. Visacro, S., F. Silveira, and A. De Conti, *Lightning Performance of 138-kV Transmission Lines: The Relevance of Subsequent Strokes*. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2013: p. 1-6.
111. *Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE)*, in *Resolución 9 00404 de 2013*, M.d.M.y. Energía, Editor. 2013.
112. Rizk, F.A.M., *Modeling of Substation Shielding Against Direct Lightning Strikes*. Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on, 2010. **52**(3): p. 664-675.
113. Cooray, V. and M. Becerra, *Attractive radii of vertical and horizontal conductors evaluated using a self consistent leader inception and propagation model - SLIM*. Atmospheric Research, Elsevier, 2012. **(Article in Press)**: p. 1-7.
114. Torres, H., S. Visacro, and B. Hermoso, *Striking distance and Attractive radius: "A new revision"*, in *International Conference on Grounding and Earthing & 3rd Brazilian Workshop on Atmospheric Electricity*. 2002: Rio de Janeiro, Brazil.
115. Chisholm, W.A. and J.G. Anderson, *Lightning and Grounding*, in *EPRI AC Transmission Line Reference Book—200 kV and Above*. 2005, Electric Power Research Institute: Palo Alto, USA. p. 351-442.
116. Wei, B., Z. Fu, and H. Yuan, *Analysis of Lightning Shielding Failure for 500 kV Overhead Transmission Lines Based on an Improved Leader Progression Model*. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009. **24**(3): p. 1433-1440.
117. Ouchi, K., et al., *Observation of lightning at 500 kV Transmission Lines (Part 1)*. IEEE Transactions PE, 1997. **117**(12): p. 1561-1567.
118. Ríos, J.B., *Líneas de Transmisión de Potencia*, in *Aspectos mecánicos y conductores*. 2004: Lima - Perú.
119. Grzybowski, S. and T. Disyadej, *Investigation on Lightning Attractive Width of Transmission Lines: Experimental Studies*, in *IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*. 2010: New Orleans, USA. p. 1-5.

120. Grzybowski, S. and T. Disyadej, *Laboratory Investigation on Lightning Flashes to High Voltage Transmission Lines*, in *11th Conference on High Voltage Engineering*. 2011: China. p. 120 - 123.
121. Grzybowski, S., T. Disyadej, and S. Mallick, *Laboratory Study for Estimating the Number of Lightning Flashes to Transmission Lines*, in *North American Power Symposium (NAPS)*. 2009: Starkville, USA.
122. He, J.-L., et al., *Influence of conductor voltage on the striking distance of electrogeometric model* Southern Power System Technology, 2007. **1**(1): p. 14-19.
123. Li, L., P. Wang, and J. Hao, *Calculation of Shielding Failure Rates for Transmission Lines in Complex Mountainous Areas*, in *Sixth International Conference on Electromagnetic Field Problems and Applications (ICEF)*. 2012: Dalian, Liaoning, China. p. 1-4.
124. Liu, H.J., et al., *Research on Shielding Failure Rated for Transmission Lines Considering Working Voltage*. *Lecture Notes in Electrical Engineering: Future Intelligent Information Systems*, 2011. **86**(1): p. 585-590.
125. Mikropoulos, P. and T. Tsovilis, *Estimation of the Shielding Performance of Overhead Transmission Lines: The Effects of Lightning Attachment Model and Lightning Crest Current Distribution*. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2012. **19**(6).
126. Mikropoulos, P.N. and T.E. Tsovilis, *Lightning attachment models and maximum shielding failure current of overhead transmission lines: implications in insulation coordination of substations*. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2010. **4**(12): p. 1299-1313.
127. Taniguchi, S., et al., *Improved method of calculating lightning stroke rate to large-sized transmission lines based on electric geometry model* *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2010. **17**(1).
128. Chijie, Z. and G. Yinan, *Research on Shielding Failure of UHDC Based on Leader Progression Model*, in *2012 International Conference on Lightning Protection (ICLP)*. 2012: Vienna, Austria.
129. Nayel, M., S. Jie, and J. He, *Analysis of shielding failure parameters of high voltage direct current transmission lines*. *Journal of Electrostatics - Elsevier*, 2012. **70**: p. 505-511.

130. Chisholm, W.A. and J.G. Anderson, *Lightning and Grounding*, in *EPRI AC Transmission Line Reference Book - 200 kV and Above*. 2005, Electric Power Research Institute: Palo Alto, CA, USA.
131. Farzaneh, M., S. Farokhi, and W.A. Chisholm, *Lightning Performance of Transmission Lines*, in *Electrical Design of Overhead Power Transmission Lines*. 2013, McGraw-Hill: New York, NY, USA. p. 547.
132. González, J., et al., *Análisis eléctrico de líneas de transmisión*. 2005, Medellín, Colombia: Univresidad Pontificia Bolivariana. 185.
133. Shafaei, A., A. Gholami, and S. Reza, *Advanced Statistical Method for Evaluating of Lightning Performance of Overhead Transmission Lines Based On Accurate Modelling and Considering Non-Vertical Strokes*, in *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering CCECE 2011*. 2011: Niagara Falls, Canada. p. 739-744.
134. Hovarth, T., *Computation of Lightning Protection*. 1991, Somerset, England: Research Study Press.

## ARTÍCULO

---